

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie

zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Pevnostní a rázové charakteristiky PLA kompozitů s přírodními vlákny

Strength and impact characteristics of PLA composites with natural fibers

Inka Drašíková

KSP – TP – B

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Běhálek - *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	54
Počet tabulek	6
Počet obrázků	47
Počet příloh	2

Datum: 24. 5. 2013

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 - Strojírenství

Student: Inka Draštíková

Téma práce: Pevnostní a rázové charakteristiky PLA kompozitů s přírodními vlákny

Strength and impact characteristics of PLA composites with natural fibers

Číslo BP: KSP - TP - B

Vedoucí BP: Ing. Luboš Běhálek - *TU v Liberci*

Konzultant BP: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Bakalářská práce je zaměřena na hodnocení pevnostních a rázových charakteristik PLA kompozitů, v závislosti na typu a množství přírodních vláken. V teoretické části se zabývá kompozity, přírodními vlákny a možnostmi jejich aplikace. V experimentální části je charakteristika PLA matrice, způsob přípravy kompozitů a jednotlivé metody pro určení mechanických vlastností včetně vyhodnocených výsledků.

Abstract:

The bachelor thesis is focused on the evaluation of strength and impact characteristics of PLA composites, depending on the type and quantity of natural fibers. The theoretical part deals with composites, natural fibers and possibilities of their use. In the experimental part is characteristic of PLA matrix, the method of preparing composites and various methods for determining the mechanical properties including the evaluated results.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....
Inka Draštíková
Bříšťany 66
508 01 Hořice

Poděkování:

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Luboši Běhálkovi za odbornou pomoc, ochotu, čas, poskytování cenných rad a trpělivost při zpracovávání bakalářské práce.

Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům za pomoc a podporu potřebnou pro zvládnutí studia.

Obsah

1 ÚVOD.....	9
2 TEORETICKÁ ČÁST.....	11
2.1 Kompozity	11
2.1.1 Matrice.....	12
2.1.2 Výztuž.....	14
2.2 Přírodní vlákna	15
2.2.1 Charakteristika vláken rostlinného původu	15
2.2.2 Charakteristika vláken živočišného původu.....	20
2.3 Aplikace kompozitů s přírodními vlákny.....	21
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
3.1 Charakteristika PLA matrice.....	24
3.2 Charakteristika přírodních vláken	25
3.3 Výroba zkušebních těles z biopolymerního kompozitu	26
3.3.1 Příprava přírodních vláken	26
3.3.2 Granulace za studena.....	27
3.3.3 Zhotovení zkušebních těles vstřikováním.....	28
3.4 Stanovení pevnostních a rázových charakteristik kompozitů	29
3.4.1 Stanovení tahových vlastností	30
3.4.2 Stanovení ohybových vlastností.....	33
3.4.3 Stanovení rázové houževnatosti Charpy	35
4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE	37
4.1 Vyhodnocení tahových vlastností	37
4.1.1 Napětí na mezi kluzu	37
4.1.2 Poměrné prodloužení při přetržení.....	39
4.1.3 Modul pružnosti v tahu	40
4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností	42
4.2.1 Modul pružnosti v ohybu	42

4.2.2 Pevnost v ohybu	44
4.3 Vyhodnocení rázové houževnatosti	46
5 ZÁVĚR.....	50
Literatura	52
Přílohy	

Seznam použitých zkratek a symbolů

PLA	Kyselina polymléčná (polylactic acid)
SEM	Scanning electron microscopy (Skenovací elektronový mikroskop)
σ_y	Napětí na mezi kluzu [MPa]
σ_m	Mez pevnosti [MPa]
ε_b	Poměrné prodloužení při přetržení [%]
E_t	Modul pružnosti v tahu [MPa]
E_f	Modul pružnosti v ohybu [MPa]
σ_{fM}	Pevnost v ohybu [MPa]
a_{cU}	Rázová houževnatost [kJ/m ²]

1 ÚVOD

Polymery jsou průmyslovými materiály po celém světě. Jejich nepostradatelnost je v poslední době čím dál výraznější, jelikož je stále vyvíjeno větší a větší množství produktů, které obsahují alespoň jeden díl z plastu [1]. V dnešní době dosáhly takového vývojového stupně, že nejenže nahrazují tradiční materiály jako je ocel, dřevo či sklo, ale svými vlastnostmi je v řadě oblastí dokonce předčí [2, 3]. Jejich velkou výhodou je nízká hustota, dobré mechanické a technologické vlastnosti, odolnost vůči korozi i chemickým účinkům a dobré tepelné a elektroizolační vlastnosti [4]. Polymery se využívají ve stavebnictví, v elektrotechnice, v lékařství, lze je použít pro výrobu obalů, přes výrobky pro domácnost, sanitární produkty, hygienické výrobky, ochranné a zdravotnické pomůcky, ale jedním z největších spotřebitelů je automobilový průmysl, který vyvíjí neustálý tlak na zlepšování užitných vlastností polymerů a polymerních kompozitů [3, 5].

Polymerní a kompozitní materiály umožňují dosáhnout nejen základního požadavku společného pro téměř všechny aplikace, tj. snížení hmotnosti, ale umožňují i mnohem větší "svobodu konstruování" a tím i lepší podmínky pro inovace. Měly by však splňovat i následující vlastnosti: pevnost a modul pružnosti přibližující se kovovým materiálům, lepší odolnost proti únavě oproti kovům, měly by mít vysokou rázovou a vrubovou houževnatost, odolávat šíření trhlin a měly by být také snadno recyklovatelné [6].

Dalo by se říci, že novým trendem v oblasti polymerních kompozitů je nahrazení skelných a uhlíkových vláken vlákny přírodními (lze hovořit o tzv. biopolymerech). Předmětem velkého zájmu je tak len, konopí, sláma, dřevo či sisal [6]. Odborníci se o tato vlákna zajímají a snaží se je používat, neboť jsou relativně snadno dostupná, mají minimální abrazivní účinky, nízkou hustotu a jsou zajímavá i z environmentálního hlediska [3, 7]. Tím, že se používají přírodní vlákna, také dochází ke snížení závislosti na fosilních surovinách.

Ovšem nejen přírodní vlákna jsou předmětem velkého zájmu. Jelikož se dnes všechny hospodářsky vyspělé země snaží bojovat proti hromadícím se polymerním odpadům, které velmi zatěžují životní prostředí a je problém

s jejich likvidací, vyrábí se biodegradovatelné polymery či kompozity. Biodegradovatelné polymery jsou všechny polymery, ve kterých k degradaci dochází působením mikroorganismů, jako jsou bakterie, houby a řasy. Produkty degradace jsou oxid uhličitý (případně methan), voda a zbytková biomasa. Jejich velkou výhodou je, že se po svém komerčním využití stanou součástí přírodního cyklu a přírodní prostředí zatíží jen minimálně. Biodegradovatelné kompozity mohou být efektivně použity v mnoha aplikacích s krátkými životními cykly či u produktů určených k jednorázovému nebo krátkodobému použití. Další výhodou je, že mohou být vyráběny a zpracovávány stejnými technologiemi jako komerční polymery. Nevýhodou biodegradovatelných polymerů je jejich vyšší cena. Lze ale předpokládat, že se bude snižovat s rostoucím objemem výroby a rozšířením aplikačních možností [2, 3].

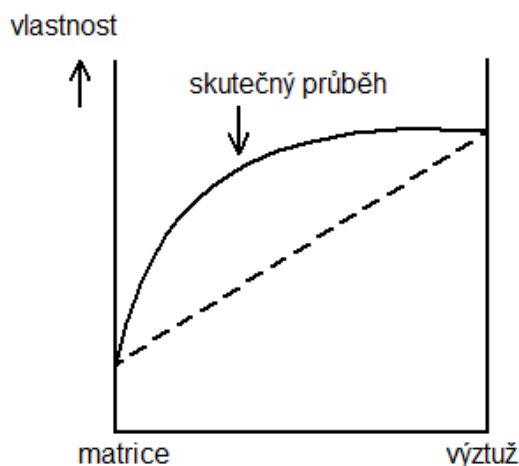
Cílem této bakalářské práce je hodnocení pevnostních a rázových charakteristik biodegradovatelného PLA kompozitu s přírodními vlákny bavlny, lnu, ramie, konopí, bambusu, sóji, banánu a vlákny ovčí vlny. V první, teoretické části, jsou popsány kompozity a jejich složení, přírodní vlákna a možnost jejich aplikace. Ve druhé, experimentální části, je popsána výroba granulátu, výroba zkušebních těles a jednotlivé metody, které byly použity pro hodnocení pevnostních a rázových charakteristik kompozitů.

2 TEORETICKÁ ČÁST

V souladu se zadáním bakalářské práce je teoretická část věnována problematice vláknových kompozitních materiálů s polymerní matricí, současnému stavu a možnostem aplikace přírodních vláken jako vláknenné výztuže v kompozitech.

2.1 Kompozity

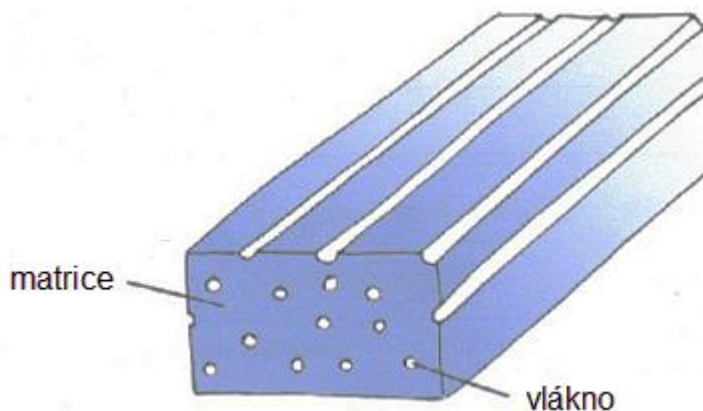
V nejobecnějším smyslu je téměř každý dnes užívaný materiál kompozitem, protože nalézt materiál používaný v čisté formě, je velmi neobvyklé. Odborníci však uvádí, že kompozit je každý materiálový systém, který je složen ze dvou a více fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou samostatně ani prostým součtem [8]. U kompozitních materiálů je charakteristický tedy tzv. synergismus (viz obr. 2.1), což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek (viz čárkovaná čára v obr. 2.1). Existence synergismu je velmi významná, neboť vede k získávání materiálů kvalitativně zcela nových vlastností [9]. Z předchozích informací vyplývá, že plasty obsahující z ekonomických a aplikačních důvodů malé množství plniv, pohlcovačů ultrafialového záření a jiných materiálů, nejsou a nemohou být obecně klasifikovány jako kompozity [10].



Obr. 2.1 Synergické chování složek kompozitu [9]

Jelikož dnes mají odborníci o mnoho více zkušeností a znalostí než dříve, navrhují se nové materiály s lepšími mechanickými vlastnostmi, jako je například pevnost, tuhost a tažnost [8, 10]. Aby se mohly navrhovat materiály s lepšími mechanickými vlastnostmi, je nutné si uvědomit, že každá složka kompozitu ovlivňuje výsledné vlastnosti systému nejen jejich charakteristickými vlastnostmi, ale i jejich vzájemnou interakcí a přináší jak dobré, tak špatné vlastnosti. Vzájemná interakce složek, fází a struktur tak hraje hlavní roli v určování výjimečných vlastností kompozitů, kterých samostatné složky nikdy nemohou dosáhnout. U navrhovaných kompozitních dílů je požadováno potlačení nevýhodných vlastností složek přednostmi složky druhé [3].

Kompozit musí obsahovat nejméně jednu spojitou fázi, která ho drží pohromadě. Tato fáze je nazývána matricí. Další fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se výztuž (viz obr. 2.2) [10, 11].



Obr. 2.2 Princip vlákny vyztuženého kompozitu [3]

2.1.1 Matrice

Podle povahy matrice se dělí kompozity do tří následujících skupin: kompozity s kovovou matricí, s polymerní matricí a s keramickou matricí, do které jsou obvykle zařazovány kompozity se skleněnými a uhlíkovými vlákny [9]. Vzhledem k zadání bakalářské práce se další odstavce věnují pouze polymerní matrici.

Hlavní výhodou polymerních matric v kompozitech je nízká hustota, proto jednou z hlavních aplikačních oblastí jejich využití je konstrukce letadel. Další z jejich předností je i odolnost proti půdní korozi, dobrá chemická odolnost a dobré dielektrické vlastnosti zejména u kompozitů se skleněnými a polymerními vlákny. Jistou nevýhodou je nízká tepelná stabilita polymerů [9, 12]. Podle vlastností i výrobního postupu se tyto kompozity výrazně liší dle toho, je-li polymerním materiálem termoplast (syntetický nebo biodegradabilní) nebo reaktoplast [8].

Reaktoplasty vyztužené vlákny jsou nesporně nejrozšířenější nenasycené konstrukční kompozity a od prvních skelných laminátů v polyesterové matici v roce 1941 (pro radarová zrcadla) zasahují dnes do všech odvětví průmyslu s širokým rejstříkem matricí, výztuží, uspořádání, způsobu výroby a vlastností. Mezi nejrozšířenější matrice patří nenasycené polyesterové, vinylesterové, epoxidové, melaminové a siloxylové pryskyřice [6]. Epoxidové pryskyřice mají nejlepší mechanické vlastnosti a větší tepelnou i chemickou odolnost. U reaktoplastických matric je však nutno řešit řadu problémů souvisejících se smáčivostí vláken, rychlostí vytvrzování, apod. [12].

V hromadné výrobě jsou stále více používány také kompozity s termoplastickými maticemi. Důvodem je snaha o recyklovatelnost materiálu kompozitních dílů, ale také technologické a ekonomické aspekty. Termoplastické kompozity umožňují velmi produktivní výrobu kompozitních dílů. Doba výrobního cyklu je kratší, než při použití pryskyřic, které je nutné vytvrdit [12]. Kompozity s termoplastickou maticí se mohou poměrně snadno dodatečně tvarovat za tepla i na velkoplošné díly nebo celé výrobky (např. vojenské čluny) či svařovat. Po ochlazení matrice jsou kompozity hotové k použití, dají se skladovat na neomezenou dobu, při zvýšené teplotě však změknou. Se zvýšeným obsahem vláken v kompozitu klesá sklon ke zkřucování [13]. Z termoplastů, které přicházejí v úvahu pro vyztužování vláken, jsou nejčastějšími typy polyamidy, polyethylen, polypropylen a polykarbonát [8].

2.1.2 Výztuž

Podle geometrického tvaru a uspořádání výztuže dělíme kompozity na částicové a vláknové s plošnou nebo trojrozměrnou výztuží. U částicových kompozitů jeden rozměr útvarů výztuže výrazně nepřesahuje rozměry ostatní. Vyztužující částice pak mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný. Naopak u vláknových kompozitů je výztuž v jednom směru výrazně rozměrnější. Podle délky vlákenné výztuže se jedná o krátkovláknové nebo dlouhovláknové kompozity [14]. Vláknové kompozity s polymerní matricí mají nejdelší tradici (první patent v roce 1946) [8].

Špičkových hodnot mechanických vlastností lze dosáhnout pouze u struktur s dlouhovláknovou výztuží v různé formě. Vláknitá výztuž při vhodné orientaci vláken k působícímu silovému toku umožňuje dosáhnout většího zvýšení tuhosti než plniva částicová. Její přínos je však ještě významnější, požaduje-li se kompozit s velkou pevností [15]. Vyztužující vlákna zvyšují hodnoty jak mechanických vlastností, jako je pevnost v tahu, tlaku, ale ovlivňují i fyzikální vlastnosti například tepelnou roztažnost. Pokud působí na kompozitní, vlákny vyztužený materiál rostoucí zatížení, začne se nejdříve ať už elasticky nebo plasticky přetvářet matrice, jelikož má nižší modul pružnosti a následně zatížení převezmou vlákna. Matrice nejen přenáší zatížení na vlákna, ale musí zajišťovat také odolnost kompozitu vůči vlivům okolního prostředí, chrání vlákna proti oxidaci, korozi a mechanickému poškození. Musí se snadno deformovat pod působícím zatížením a především zabraňovat rozvoji trhlin [3].

Mezi nejpoužívanější vlákna k vyztužení polymerních matric patří především skelná (tzv. sklolamináty) a uhlíková vlákna, která jsou z mechanického hlediska největším přínosem pro oblast kompozitů (mají nejširší spektrum mechanických vlastností), kromě toho jejich cena klesá a po technicko-ekonomické stránce se stávají vedle skleněných vláken stále žádanějším vyztužujícím materiálem (letecké aplikace, chassi automobilů, aj.) [16]. V posledních letech se vědci zabývají otázkou možností nahrazení skelných vláken přírodními materiály [3]. Předmětem velkého zájmu jsou tak len, konopí, sláma, celulóza či dřevo, které jsou surovinami pro výrobu vláken. Vzhledem k zaměření bakalářské práce je těmito materiály

věnována samostatná kapitola 2.2. Přírodních materiálů bylo použito však mnohem dříve, neboť z historického hlediska lze aplikace kompozitu datovat do roku 1908, kdy bylo poprvé použito kompozitního materiálu na bázi fenolické pryskyřice zpevněné dřevitou moučkou.

Jedním z novějších vývojových směrů jsou kompozity s trojrozměrnou výztuží [16]. Při mechanickém namáhání se tím zabraňuje delaminačním procesům, ke kterým může docházet u běžně používaných výztuží plošných.

2.2 Přírodní vlákna

Přírodních vláken existuje velmi mnoho. Dle jejich původu a chemického složení je lze rozdělit do dvou skupin: rostlinná a živočišná. Předností přírodních vláken je především jejich nízká hmotnost, biodegradabilita, nízká abraze, což zvětšuje životnost zpracovatelských zařízení a také nízká cena, která je na rozdíl od syntetických polymerů nezávislá na ceně ropy [7, 17]. Nevýhodou je naopak navlhavost, menší rozměrová stabilita a degradace oxidací.

Vybranými vlákny rostlinného a živočišného původu, použitých v experimentální části bakalářské práce se zabývají kapitoly 2.2.1 a 2.2.2.

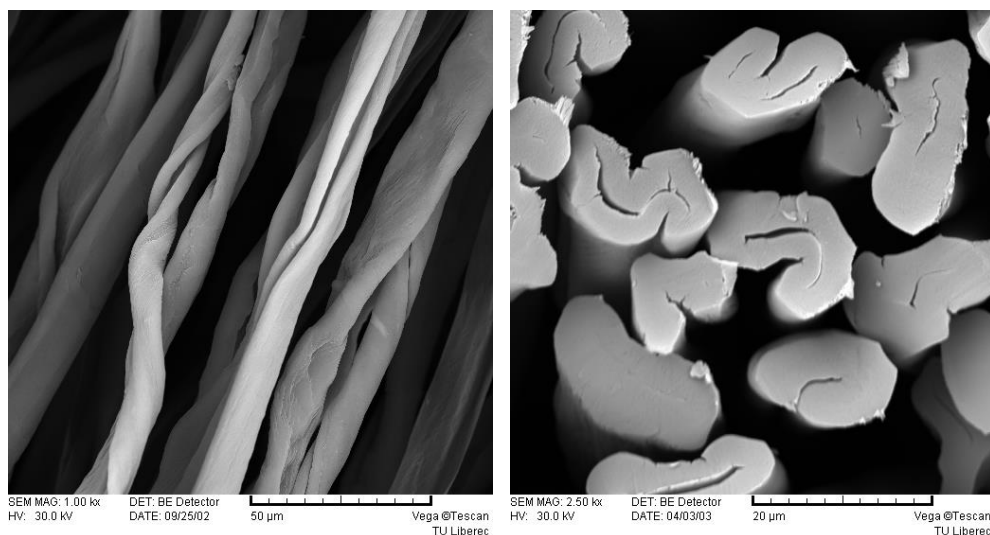
2.2.1 Charakteristika vláken rostlinného původu

Rostlinná vlákna jsou vyztužena spirálovitě vinutými mikrofibrilami celulózy, které jsou spojeny amorfní ligninovou matricí. Lignin udržuje vodu ve vláknech, působí jako ochrana proti biologickému napadení rostliny a jako výztuha, která dodává stonku jeho resistenci proti gravitačním silám a větru. Krom ligninu a celulózy obsahují rostlinná vlákna i hemicelulózu, která působí jako kompatibilizér mezi celulózą a ligninem. Tyto tři složky mají největší podíl (viz tab. 2.1). Nelze ale zapomenout ani na obsah vosku a různých vodou rozpustných sloučenin. Rostlinná vlákna se dělí na vlákna ze semen (bavlna, kapok), vlákna z lodyh - stonků (len, konopí, juta, ramie, kenaf, kopřiva, bambus), vlákna z listů (sisal, manilské konopí, novozélandský len, agáve, aloe, rašelina) a na vlákna z plodů (kokos) [3, 18, 19].

Tab. 2.1 Chemické složení, obsah vlhkosti a mikrofibrilární úhel rostlinných vláken [3, 18]

	Celulóza	Hemicelulóza	Lignin	Pectin	Obsah vlhkosti	Vosky	Mikrofibrilární úhel
Vlákn	(hm. %)	(hm. %)	(hm. %)	(hm.%)	(hm. %)	(hm. %)	(°)
Len	71	18,6 - 20,6	2,2	2,3	8 - 12	1,7	5 - 10
Konopí	70 - 74	17,9 - 22,4	3,7 - 5,7	0,9	6,2 - 12	0,8	2 - 6,2
Juta	61 - 71,5	13,6 - 20,4	12 - 13	0,2	12,5 - 13,7	0,5	8
Kenaf	45 - 57	21,5	8 - 13	3 - 5			
Ramie	8,6 - 76,2	13,1 - 16,7	0,6 - 0,7	1,9	7,5 - 17	0,3	7,5
Kopřiva	86				11 - 17		
Sisal	66 - 78	10 - 14	10 - 14	10	10 - 22	2	10 - 22
Henequén	7,6	4 - 8	13,1				
Ananas	70 - 82		5 - 12,7		11,8		14
Banán	63 - 64	10	5		10 - 12		
Abaca	56 - 63		12 - 13	1	5 - 10		
Palma olejná	65		19				42
Palma olejná mesokarp	60		11				46
Bavlna	85 - 90	5,7		0 - 1	7,85 - 8,5	0,6	
Kokos	32 - 43	0,15 - 0,25	40 - 45	3 - 4	8		30 - 49
Bambus	35 - 45	20 - 25	30				
Sláma obilná	38 - 45	15 - 31	12 - 20	8			

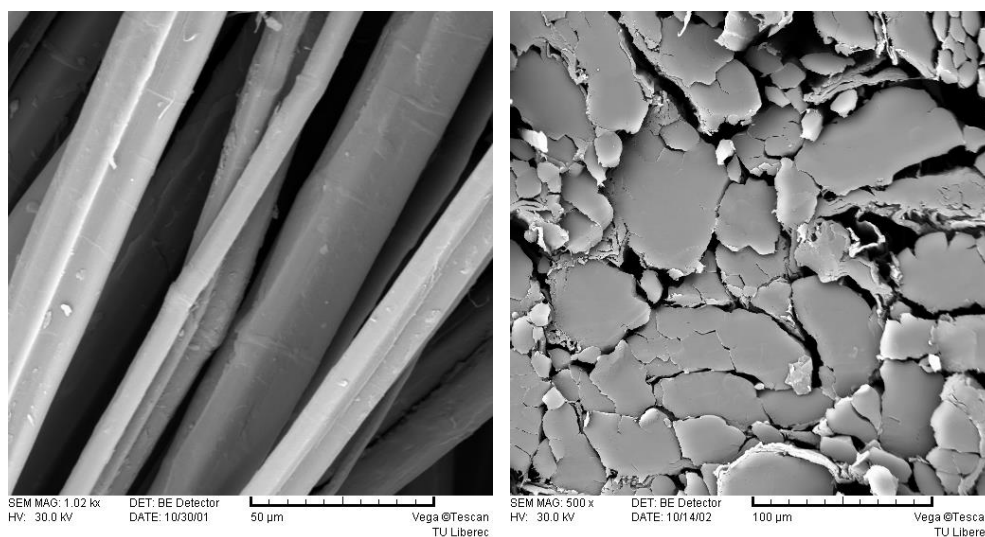
Bavlna patří mezi nejstarší textilní vlákna (viz obr. 2.3). Získávají se z tobolky bavlníku, kde vyrůstá na semenu jemné, až 6 cm dlouhé vlákno. Vlákna mají bílou až smetanově žlutou barvu, jsou dutá a zploštělá a po celé délce šroubovitě zkroucená. Mají velmi dobrou pevnost, která se zvyšuje za vlhka



Obr. 2.3 Vlákna bavlny (SEM)

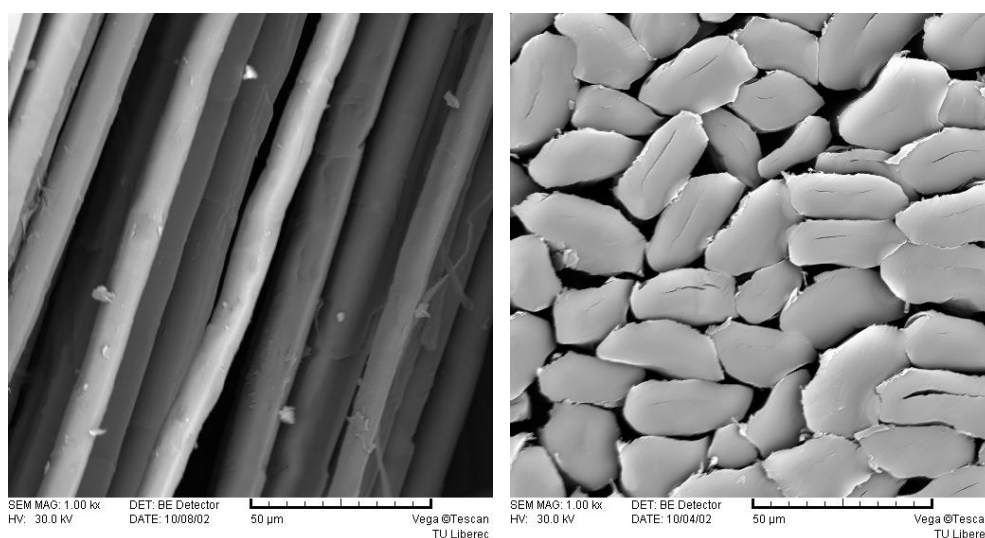
až o 20%. Pružnost bavlněných vláken je velmi malá, proto se výrobky z bavlny snadno zmačkají [17].

Lněné textilní vlákno se získává ze stonku lnu setého (viz obr. 2.4). Ten se sklízí vytažením rostliny s kořínky, aby byla zachována přirozená délka lněných vláken, která jsou umístěna v lýkové vrstvě rostliny. Sklizený len se vyčesává po odstranění semen. Elementární vlákno je v průměru o něco delší a pevnější, než například bavlna. Pevnost lnu se za mokra zvyšuje až o 20 %. Vlákná mají malou pružnost a dobrou tepelnou vodivost [7, 20].



Obr. 2.4 Vlákná lnu (SEM)

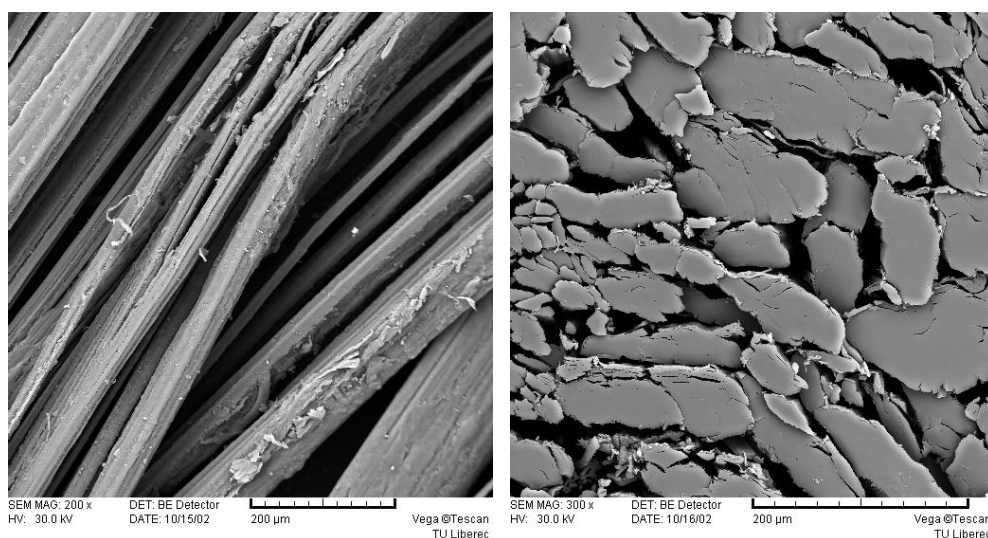
Ramie je tropická rostlina, která dosahuje až 5 metrů výšky, její stonek má



Obr. 2.5 Vlákná ramie (SEM)

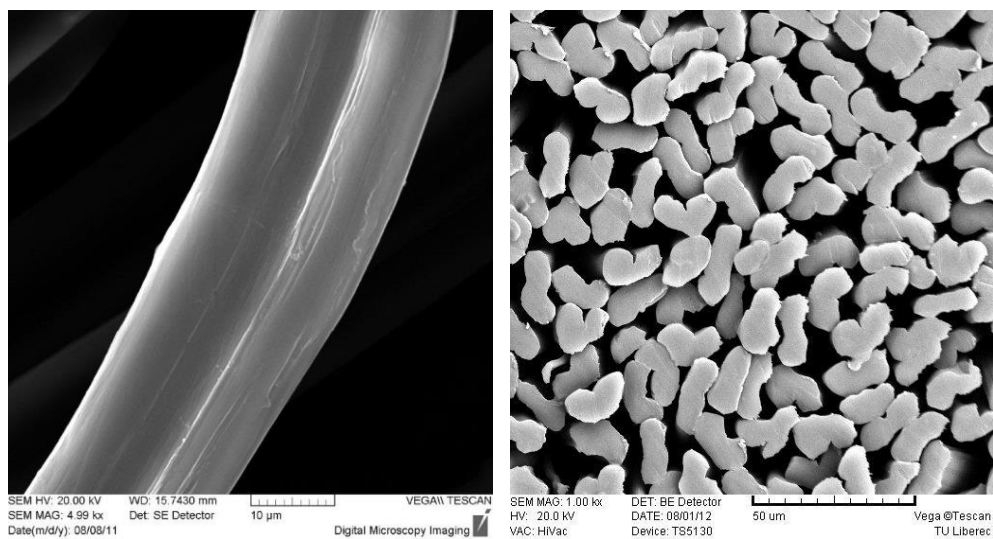
tloušťku asi 2 cm a pěstuje se pro lýkové vlákno (viz obr. 2.5). Ze 100 kg nařezaných stonků dospělých rostlin se získá asi 1 kg spřadatelných vláken. Oddělování vláken od stonku se neprovádí jako u jiných lýkových vláken rosením, ale chemickými prostředky, protože se zde pektiny nedají odbourávat bakteriemi. Vlákná ramie mohou pojmout až 20 % vlhkosti a na omak jsou tvrdší než bavlna [21].

Konopná textilní vlákna se získávají ze stonku konopí setého (viz obr. 2.6). Pevnost vlákna, která za sucha dosahuje až 690 mN/tex (tex představuje délkovou hustotu, konkrétně hmotnosti 1 kilometru příze v gramech) je v průměru vyšší než u lnu a zvyšuje se za mokra až o 20 %. Jejich nedostatkem je drsnost a v důsledku silného zdřevnatění i tuhost a nepoddajnost [17, 22, 23].



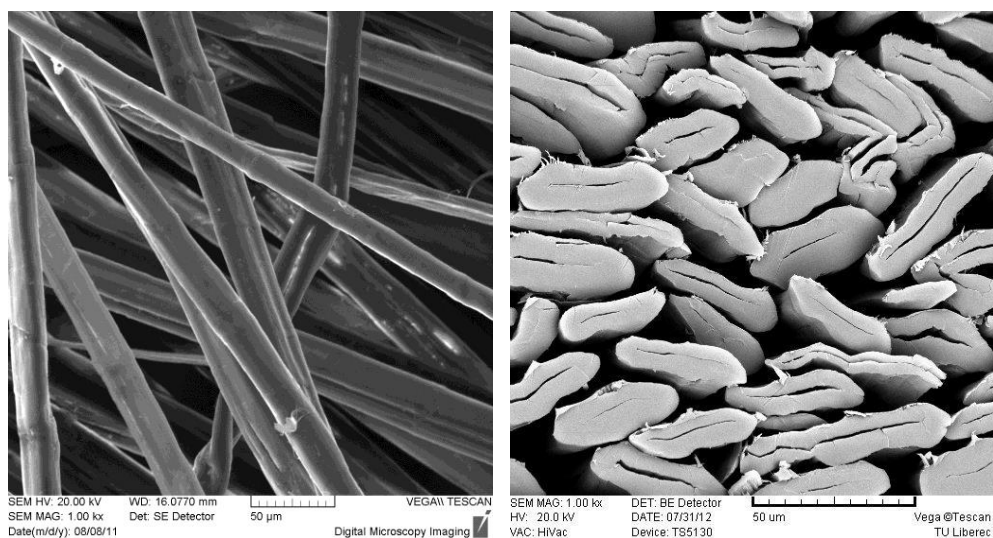
Obr. 2.6 Vlákná konopí (SEM)

Sója je dvojděložná samosprašná rostlina pěstovaná komerčně ze semene. Sojová moučka obsahuje až 35 % bílkovin. Extrakcí v heptanu se odstraňuje olej. V roztoku siřičitanu sodného se extrahuje protein. Spřádací roztok se připravuje v rozpuštěném proteinu ve vodných roztocích sody. Zvlákňuje se do srážecí kyselé lázně. Pevnost za sucha 0,7 cN/dtex, za mokra 0,22 cN/dtex a tažnost za sucha 50,5 %. Sójová vlákna jsou zobrazena na obr. 2.7 [18, 24].



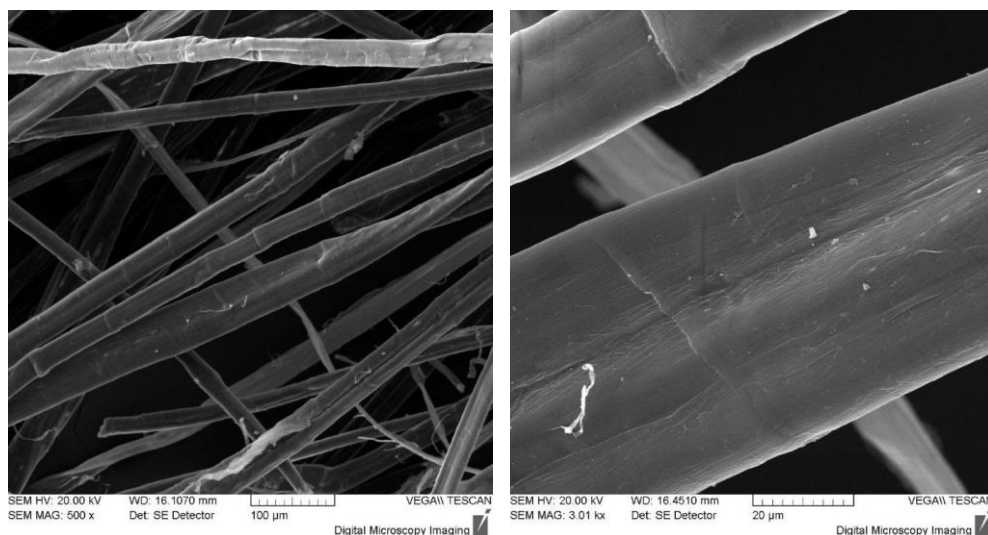
Obr. 2.7 Sójová vlákna (SEM)

Banánová vlákna (viz obr. 2.8) nejsou rovná a mají poněkud hrubou strukturu díky svému neobvyklému tvaru a tloušťce vláken [25].



Obr. 2.8 Banánová vlákna (SEM)

Bambusové textilní vlákno je známo teprve od konce 20. století (viz obr. 2.9). Užité vlastnosti jsou podobné jako u ramie. Bambusové vlákno je přirozeně antibakteriální, protiplísňové a antistatické [26, 27].

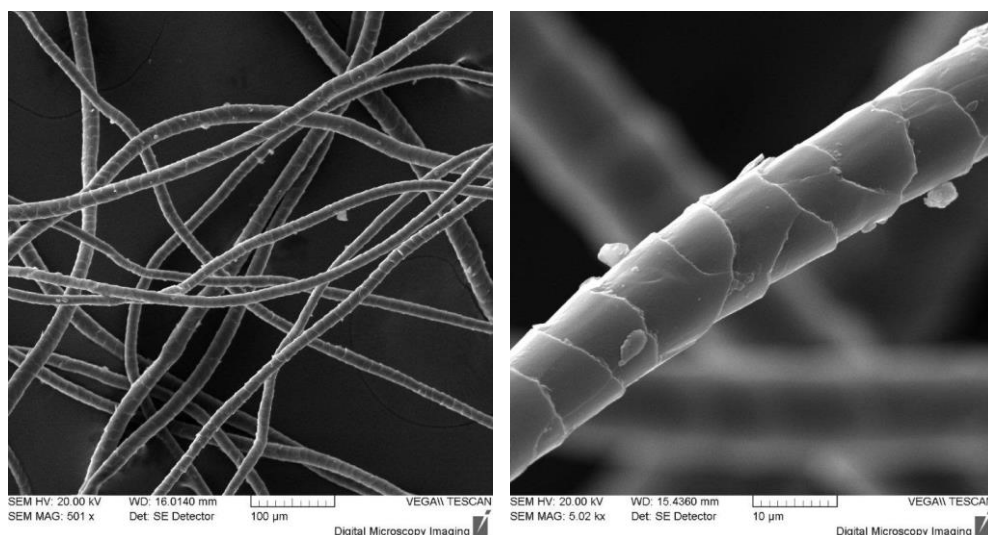


Obr. 2.9 Bambusová vlákna (SEM)

2.2.2 Charakteristika vláken živočišného původu

Živočišná vlákna získáváme ze srsti zvířat a zámotků housenek některých motýlů. Příkladem živočišných vláken je například vlna ovčí, velbloudí, mohér, králičí srst a vlákna ze zámotků bource morušového [28].

Ovčí vlna je surovina ze srsti ovce domácí. Na každé ovci za rok naroste od 3 kg do 18 kg vlny. Tato vlna se stříhá jednou nebo dvakrát do roka. Ostříhaná vlna se ukládá jako celistvé rouno, jehož různé části se později zařazují do určitých kvalitativních tříd. Surová (potní) vlna obsahuje v průměru jen méně než polovinu váhového množství spřadatelných vláken, 10 ÷ 45 % je tuk a pot, 5 ÷ 20 % jsou nečistoty, které se dostaly do srsti na pastvině. Mimo to mohou vlákna pojmout až 25 % vlhkosti. Tuk a pot se



Obr. 2.10 Vlákna ovčí vlny (SEM)

odstraňuje praním a rostlinné příměsi se karbonizují. Čisté vlákno je složeno z keratinu, pigmentu a chemicky vázané vlhkosti. Z chemických prvků je z 50 % zastoupen uhlík, s dalšími 40 % kyslík a dusík. Povrch vlákna je šupinovitý. Zvláštní struktura řetězcové molekuly dává vláknu vynikající pružnost a ohebnost. Vlákná ovčí vlny (viz obr. 2.10) mají menší pevnost než jiná přírodní vlákna a za mokra ztrácí dalších 10 – 20 % pevnosti [29].

2.3 Aplikace kompozitů s přírodními vlákny

Aplikace přírodních vláken je významnou materiálovou obměnou, která tradičně směřuje také do automobilového průmyslu. Kompozitní polymery obsahující přírodní vlákna mají lepší elektrostatické vlastnosti, lépe tlumí hluk, absorbují vibrace a jsou lepšími tepelnými izolanty. Kompozity s přírodními vlákny umožňují v automobilovém průmyslu dosáhnout základního požadavku, tedy snížení hmotnosti vozu. Díky váhovému úbytku dochází ke snížení spotřeby paliva, což je velkým pozitivem v otázce ochrany životního prostředí. Další předností je environmentální hledisko, umožňující snadnější recyklaci a to díky nahrazení chemických vláken (skleněných a karbonových) vlákny přírodními. Přírodní vlákna dokáží oproti skelným vláknům zmenšit objem až o 30 % a zachovat obdobné mechanické vlastnosti materiálu. Velmi dobrou vlastností je také schopnost absorbovat velké množství rázové energie, což je zvláště důležité při výrobě bezpečných automobilů. V automobilech jsou tyto kompozity aplikovány jak v oblasti interiéru tak exteriéru. Lze je použít při výrobě nárazníků, pedálů, dveřních výplní a dalších interiérových dílech (viz obr. 2.11) [3, 30].

Nejpoužívanějšími přírodními vlákny jsou vlákna lněná, konopná, bambusová, vlákna bavlny, sisalu, juty a dřeva. Známými aplikacemi jsou díly v Mercedesu třídy C, Daimler AG (např. výplně dveří a zvuková izolace), zadní kryt motoru autobusu vyrobený z rohože z přírodních vláken, apod. Odhaduje se, že v roce 2009 bylo v každém vyrobeném osobním a nákladním vozidle v průměru 40 kg přírodních vláken, především jako výztuž tvarovaných dílů pro interiéry [31].

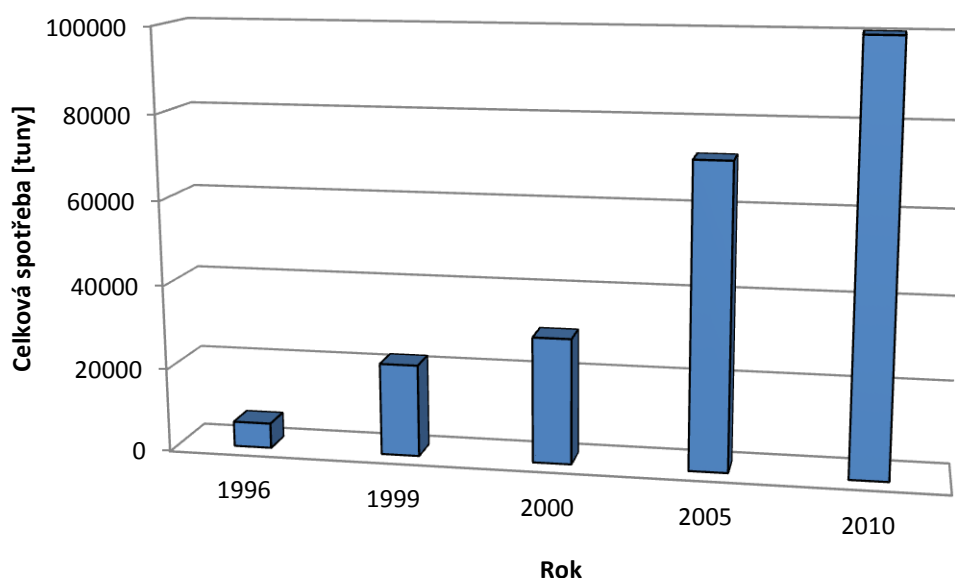


Obr. 2. 11 Aplikace kompozitů s přírodními plnivy v automobilovém průmyslu
a, b: zobrazené kompozity obsahují 50% polypropylenu a 50 % konopí [32]; c: výroba výztuže do dveří z kompozitu s konopnými vlákny [32]; d: spodní kryt nosiče náhradního kola vozu vyrobený z polypropylenového kompozitu vyztuženého abakovými vlákny [33];
e: výztuž do sedadel [32]

Také letecký sektor se zaměřuje na získání kompozitů, které splní vysoké technické požadavky, budou snadno recyklovatelné a užitečné po použití. V letadlech jsou tyto kompozity aplikovány například k výrobě nádob na palivo nebo sedadel. Další možnou aplikací kompozitů s přírodními vlákny jsou vlaky. Výhodou vysokorychlostních vlaků z polymerních

kompozitů oproti tradičním dopravním prostředkům je to, že jsou až o 30 % lehčí. I zde platí, že díky snížené hmotnosti je nižší spotřeba paliva a dá se dosáhnout vyšších rychlostí. Ovšem stejně jako v automobilovém průmyslu zde hraje roli i vysoká pevnost a tuhost, nevodivost, snadná manipulace a nízká údržba. I ve vojenské technice se lze setkat s kompozity s přírodními vlákny. Samozřejmým požadavkem je zde opět nízká hmotnost a vysoká pevnost. Velmi významnou oblastí, která také s kompozity pracuje již dlouhou dobu, je lékařství. S kompozity s přírodními plnivý se můžeme setkat i ve sportu a stavebnictví [3, 30].

Díky speciálním vlastnostem a všestrannému použití přírodních vláken se předpokládá nárůst jejich poptávky a produkce. Z obr. 2.12 je patrné, že země Evropské unie vykazují nárůst použití rostlinných surovin pro obnovitelnou produkci tzv. biopolymerů pro různé použití [3].



Obr. 2.12 Růst spotřeby přírodních vláken v západní Evropě [3]

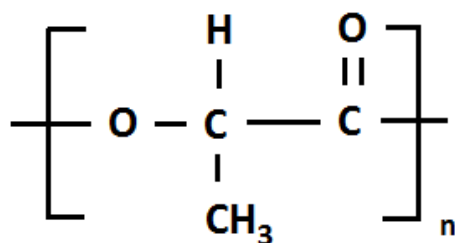
Při zpracování přírodních materiálů je třeba počítat s jejich hydrofilní vlastností, která způsobuje bobtnání vláken, což může vést až k případnému rozkladu vláken vlivem plísní. Přírodní materiály jsou také velmi polární a jsou tak proto prakticky nekompatibilní s hydrofobními termoplasty. Proto je vždy nutné pomocí vhodných aditiv nebo úpravou povrchu vláken zajistit dostatečnou adhezi mezi polárními hydrofilními přírodními vlákny a nepolární hydrofobní polymerní maticí.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část bakalářské práce se zabývá charakteristikou použité biodegradovatelné PLA matrice (kyseliny polymléčné), přírodními vlákny, přípravou kompozitů granulací za studena, z nichž byla následně zhotovena normalizovaná zkušební tělesa a způsobem stanovení pevnostních i rázových charakteristik kompozitů dle mezinárodních standardů v souladu se zadáním bakalářské práce. Kompozitní materiál s PLA matricí obsahuje přírodní vlákna rostlinného a živočišného původu s obsahem 10 hm. %, 20 hm. % a 30 hm. %.

3.1 Charakteristika PLA matrice

K přípravě kompozitů bylo použito biopolymerního materiálu PLA (polylactic acid) od firmy NatureWorks LLC s obchodním označením biopolymer 3251D. Chemické znázornění konstituční jednotky makromolekulárního řetězce je uvedeno na obr. 3.1 a vybrané užité vlastnosti polymeru v tab. 3.1. Jedná se o termoplastický, alifatický polyester vyráběný z kyseliny mléčné (laktidu), která vzniká např. fermentací cukrů nebo škrobů. PLA materiál má dobré mechanické vlastnosti podobné polyolefinům, což předurčuje jeho aplikační možnosti v analogických oblastech, tedy i v těch technických, zejména pak v automobilovém průmyslu. Je poměrně vysoce transparentní, nerozpustný ve vodě, odolný vůči vlhkosti, tukům a olejům, má také dobrou odolnost vůči UV záření. PLA je plně biodegradovatelný kompostováním, což znamená, že splňuje některou z norem, například dle ASTM: D6400 pro kompostovatelné plasty a D6868 pro kompostovatelné obaly. Mechanické vlastnosti i proces biodegradace jsou v případě PLA materiálu ovlivněny poměrem L a D isomerů mléčné kyseliny přítomných v polymeru. Biodegradace probíhá při běžných laboratorních podmínkách pomalu. Pokud ale dojde ke zvýšení degradační teploty nad teplotu skelného přechodu (kolem 55 °C), tak se zvýší i rychlost rozkladu. Díly vyrobené z PLA jsou tak zcela degradovatelné jen za podmínek komunálního kompostování, neboť k rozkladu dochází až při vyšších teplotách (nad 60 °C) [2, 34].



Obr. 3.1 Konstituční jednotka makromolekulárního řetězce kyseliny polymléčné [2]

Tab. 3.1 Fyzikální a mechanické vlastnosti PLA matrice [35]

vlastnosti	hodnoty	jednotky	ASTM metoda
hustota	1,24	[g/cm ³]	D792
hmotnostní index toku taveniny MFR (210°C, 2,16kg)	80	[g/10min]	D1238
hmotnostní index toku taveniny MFR (190°C, 2,16kg)	35	[g/10min]	D1238
relativní viskozita	2,5	[-]	-
teplota tání	155 - 170	[°C]	D3418
teplota skelného přechodu	55 - 60	[°C]	D3418
mez kluzu	62	[MPa]	D638
poměrné prodloužení při přetržení	3,5	[%]	D638
vrubová houževnatost Izod	16	[J/m]	D256
pevnost v ohybu	108	[MPa]	D790

3.2 Charakteristika přírodních vláken

Přírodních vláken existuje poměrně velké množství. Z hlediska původu existují dvě skupiny: rostlinná a živočišná. Výběr přírodních vláken pro studium pevnostních a rázových charakteristik PLA kompozitů byl proveden na základě zkušeností výzkumného týmu katedry strojírenské technologie při studiu pevnostních a rázových charakteristik kompozitů, avšak se syntetickou polypropylenovou matricí (v rámci projektu TA0101946). Dalším důležitým faktorem při výběru typu přírodních vláken byla cena, neboť v důsledku vysoké ceny biopolymerní matrice (vzhledem k syntetickým polymerům) by při použití drahých přírodních vláken plniv cena biokompozitů neúměrně stoupla a tím by se omezily aplikační možnosti kompozitů v průmyslové praxi. Z tohoto důvodu byla pro experimentální účely vybrána vlákna ramie, vlny, lnu, sóji, banánu, bambusu, bavlny a konopí, jimž jsou věnovány kap. 2.2.1 a kap. 2.2.2.

3.3 Výroba zkušebních těles z biopolymerního kompozitu

Zkušební tělesa pro hodnocení pevnostních a rázových charakteristik kompozitů byla zhotovena vstřikováním. S ohledem na tuto skutečnost bylo nejprve nutné připravit granulát kompozitu, z něhož byla následně zhotovena zkušební tělesa odpovídající mezinárodním standardům. Kompozitní materiál byl připraven granulací za studena, přičemž před vlastním procesem bylo zapotřebí vhodně připravit přírodní vlákna i polymerní matici. Vzhledem ke skutečnosti, že přírodní vlákna jsou působením hydroxylových skupin velmi polární (hydrofilní), a rovněž PLA matrice je polárním materiálem (což vedlo k dostatečné smáčivosti a adhezi na mezifázovém rozhraní vláken a matrice) nebylo na rozdíl od hydrofobní (nepolární) polypropylenové matrice nutné při granulaci kompozitu přidávat kompatibilizační aditivum.

3.3.1 Příprava přírodních vláken

Vlákna byla před zpracováním u jejich dodavatelů zbavena drobných organických nečistot, tuků, atd., které se do plniva mohly dostat nevhodnou manipulací, uskladněním, či při samotné výrobě plniva. Následně byla v laboratorích katedry strojírenské technologie upravena jejich délka mletím, podle studií na katedře strojírenské technologie se ideální délka namletých přírodních vláken pohybuje v rozmezí od 0,5 do 2 mm [36]. Použít lze různé druhy mlýnů, např. nožový, kladivový, třecí, talířový či kulový. K namletí přírodních vláken v rámci experimentální studie byl použit nožový střížný mlýn RETSCH SM 300 s cyklónovým odlučovačem (viz obr. 3.2) s otáčkami 3000 min^{-1} a se síty s lichoběžníkovými otvory 0,75 mm.

Dalším krokem před výrobou kompozitů bylo sušení, neboť s ohledem na zpracovatelské podmínky při granulaci bylo nutné vlákna i PLA matici zbavit vlhkosti. K sušení byla použita skříňová sušárna VENTICELL (viz obr. 3.3) s nucenou cirkulací vzduchu. Sušení probíhalo při teplotě $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 2 až 4 hodin.



Obr. 3.2 Nožový střížný mlýn RETSCH SM 300 Obr. 3.3 Sušící zařízení Venticell

3.3.2 Granulace za studena

Pro přípravu granulátu byla zvolena metoda studené granulace ze strun a to s ohledem na její dostupnost v laboratoři katedry strojírenské technologie, vysokou výkonnost, kvalitu výsledného produktu a zkušenosti související s přípravou vlákenných kompozitů na pracovišti katedry. Ke granulaci byla použita granulační linka ZAMAK EHP-2x130di (viz obr. 3.4), která je tvořena dvoušnekovým extrudérem se segmentovými šneky umožňující jejich proměnnou délku, plastikační komorou, granulační hlavou na struny, vodní lázní o teplotě chladicího média 15 °C, vodícími válečky, ventilátorem a nožovým mlýnem s podavači na sekání struny. Při samotné granulaci byla PLA matrice vložena do násypky vytlačovacího stroje, odkud byl materiál dávkován do tavicí komory a plastifikován pomocí tlaku vyvolaného rotací šneku (180 ot/min) a účinku teplotního ohřevu (180 °C ÷ 190 °C). Do přední pozice šneku v tavicí komoře byla dávkována přírodní vlákna v množství 10 hm. %, 20 hm. % a 30 hm. % tak, aby nedošlo k jejich poškození smykovým namáháním při hnětení a plastikaci materiálu nebo tepelné degradaci. Vytlačovaná struna se po ochlazení sekala

na požadovanou délku granulí ($2\text{ mm} \div 3\text{ mm}$). Tímto postupem byl získán granulát kompozitu s přírodními vlákny.



Obr. 3.4 Granulační linka ZAMAK

3.3.3 Zhotovení zkušebních těles vstřikováním

Zkušební vzorky ve tvaru víceúčelových zkušebních těles typu A dle ČSN EN ISO 3167 (pro hodnocení pevnostních a rázových charakteristik kompozitů) byly zhotoveny vstřikováním v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 294-1 na vstřikovacím stroji ARBURG 270 S 400-100 (viz obr. 3.5) za technologických podmínek uvedených v tab. 3.2. Materiál byl před vstřikováním sušen při teplotě $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 3 hodin. K výrobě zkušebních těles bylo použito univerzální dvoudeskové a dvojnásobné vstřikovací formy s výměnnou tvarovou deskou, odpovídající tvaru víceúčelových zkušebních těles, s chlazením formy pomocí cirkulující vody v temperačních kanálech. Tvarové dutiny byly plněny paralelně se směrem toku taveniny a s vtokovým ústím umístěným na konci každého tělesa dle ČSN EN ISO 294-1. Všechna zkušební tělesa po výrobě byla kondicionována ve standardním prostředí 23/50 dle ČSN EN ISO 291.



Obr. 3.5 Vstřikovací stroj ARBURG 270 S 400-100

Tab. 3.2 Technologické podmínky vstřikování

Parametr	Hodnota	Jednotka			
Teplota taveniny (viz teplotní profil tavící komory)	180 ÷ 190	°C			
Teplota temperačního média formy	40	°C			
Doba cyklu	60	s			
Doba dotlaku	40	s			
Velikost dotlaku	40	MPa			
Velikost dávky	40	cm ³			
Bod přepnutí na dotlak	16	cm ³			
Vstřikovací rychlost	30	cm ³ /s			
Teplotní profil tavící komory stroje					
násypka	4. zóna	3. zóna	2. zóna	1. zóna	tryska
40 °C	160 °C	170 °C	180 °C	190 °C	190 °C

3.4 Stanovení pevnostních a rázových charakteristik kompozitů

Pevnostní charakteristiky PLA kompozitů s přírodními vlákny byly stanoveny a následně hodnoceny v souladu se zadáním bakalářské práce při zatěžování v tahu (dle ČSN EN ISO 527) a ohybu (dle ČSN EN ISO 178). Rázové vlastnosti kompozitů byly analyzovány metodou Charpy (dle ČSN EN ISO 179-1) za standardních podmínek 23/50 dle ČSN EN ISO 291 a s ohledem na zamýšlené aplikace v automobilovém průmyslu také při teplotě -35°C.

3.4.1 Stanovení tahových vlastností

Tahová zkouška probíhá při jednoosém tahovém zatěžování. Provádí se na tělesech definovaných normou, při stanovených podmínkách předběžné úpravy, zkoušení a konstantní rychlosti. Výsledky zkoušky závisí na podmínkách výroby zkušebních těles, materiálu a na podmínkách v průběhu samotné zkoušky.

Měření tahových vlastností probíhalo ve dvou fázích. Nejprve byl na zkušebním zařízení Tira test 2300 (viz obr. 3.6) s měřicí hlavou 1000 N měřen modul pružnosti v tahu. Zatěžovací rychlost byla 1 mm/min. Zkušební těleso se vložilo do čelistí stroje tak, aby podélná osa zkušebního tělesa byla shodná s osou zkušebního stroje. Čelisti se rovnoměrně a pevně utáhly, aby se zabránilo vyklouznutí zkušebního tělesa a pohybu čelistí v průběhu zkoušky [37]. Následně byl upevněn extensometr EPSILON typu 3542 - 010M (viz obr. 3.7). Naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu, určeného jako sečna křivky napětí / poměrného prodloužení (při $\varepsilon_1 = 0,05 \%$ a $\varepsilon_2 = 0,25 \%$) jsou uvedeny v tabulce 3.3.



Obr. 3.6 Zkušební zařízení Tiratest 2300



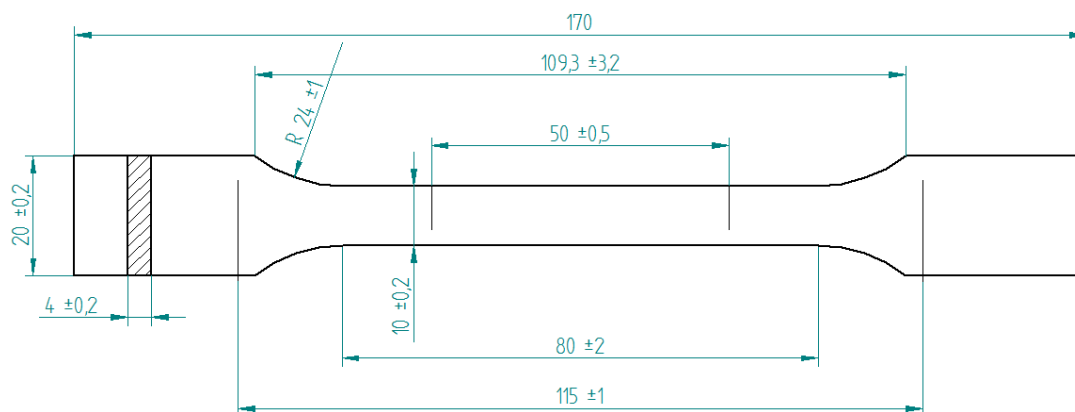
Obr. 3.7 Zkušební vzorek s extensometrem

Ve druhé fázi byly měřeny zbylé tahové vlastnosti na trhacím zařízení Hounsfield H10KT (viz obr. 3.8) s měřicí hlavou do 10 kN, průtahoměrem 100RC a programovým vybavením QMAT. I na tomto zkušebním zařízení se zkušební těleso vložilo do čelisti stroje tak, aby podélná osa zkušebního tělesa byla shodná s osou zkušebního stroje (viz obr. 3.9) a čelisti se rovnoměrně a pevně utáhly, aby se zabránilo vyklouznutí zkušebního tělesa a pohybu čelistí v průběhu zkoušky [37].



Obr. 3.8 Trhací zařízení Hounsfield H10KT Obr. 3.9 Detail uchycení vzorku

Při zkoušce bylo zkušební těleso protahováno ve směru své hlavní podélné osy zkušební rychlostí 50 mm/min až do jeho porušení. Měření bylo provedeno na pěti vzorcích, u kterých bylo požadováno, aby došlo k lomu v měřené části. Během zkoušky se získávala závislost napětí na poměrném prodloužení (viz Příloha 1), z níž jsou odečteny hodnoty napětí na mezi kluzu a poměrné prodloužení při přetržení (viz tab. 3.3). Rozměry a tvar použitého zkušebního tělesa 1A jsou uvedeny na obrázku 3.10.



Obr. 3.10 Rozměry zkušebního tělesa typu 1A dle ČSN EN ISO 527 [37]

Tab. 3.3 Tahové vlastnosti PLA kompozitů

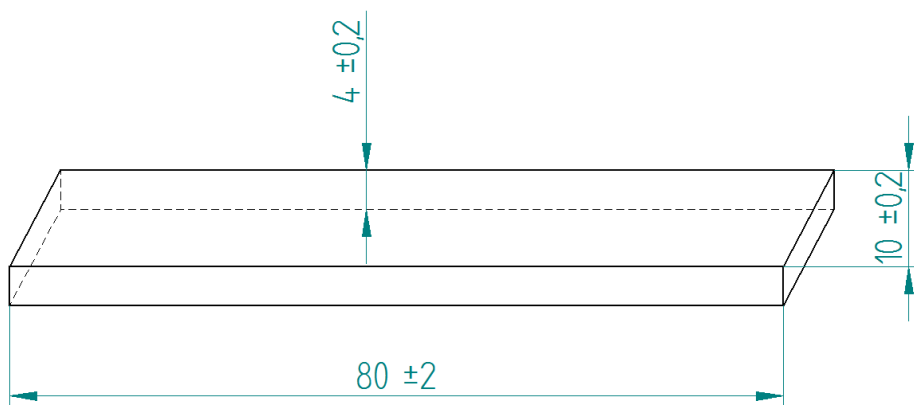
Kompozit / typ vláken		napětí na mezi kluzu σ_y [MPa]	poměrné prodloužení při přetržení ϵ_b [%]	modul pružnosti v tahu E_t [MPa]
Čisté PLA		66,0 ± 2,1	3,5 ± 0,8	3394,3 ± 94,4
ramie	10%	59,3 ± 0,7	2,2 ± 0,3	3703,4 ± 103,7
	20%	58,1 ± 0,3	2,0 ± 0,1	4200,6 ± 200,3
	30%	58,7 ± 0,2	2,3 ± 0,4	4752,6 ± 89,0
vlna	10%	52,6 ± 0,4	3,6 ± 0,5	3611,4 ± 123,0
	20%	47,3 ± 1,2	2,5 ± 0,9	3760,5 ± 69,4
	30%	38,3 ± 3,4	1,2 ± 0,3	3882,6 ± 87,4
len	10%	58,4 ± 0,6	2,2 ± 0,6	3662,2 ± 180,2
	20%	56,4 ± 0,4	2,3 ± 0,4	3739,7 ± 209,4
	30%	55,8 ± 0,3	2,5 ± 0,6	4181,2 ± 151,9
sója	10%	64,3 ± 1,1	2,0 ± 0,1	3641,8 ± 95,0
	20%	62,5 ± 2,9	1,8 ± 0,2	3851,2 ± 114,9
	30%	62,8 ± 2,4	1,7 ± 0,1	4023,1 ± 84,4
banán	10%	59,8 ± 13,6	2,4 ± 0,4	3835,4 ± 67,0
	20%	61,0 ± 0,9	2,0 ± 0,4	4381,1 ± 67,4
	30%	63,1 ± 2,1	1,9 ± 0,3	4958,6 ± 232,6
bambus	10%	64,4 ± 1,8	2,0 ± 0,2	3647,7 ± 145,6
	20%	63,6 ± 0,8	1,8 ± 0,1	3718,8 ± 116,5
	30%	62,4 ± 0,9	1,7 ± 0,2	3767,1 ± 69,5
bavlna	10%	59,1 ± 0,3	3,6 ± 1,4	3698,1 ± 107,0
	20%	58,6 ± 0,3	3,5 ± 0,9	4042,8 ± 119,3
	30%	59,2 ± 0,3	3,6 ± 0,3	4140,5 ± 160,8
konopí	10%	60,7 ± 0,5	3,7 ± 0,6	3531,7 ± 78,4
	20%	57,3 ± 0,3	3,6 ± 0,4	3826,4 ± 107,5
	30%	54,8 ± 0,4	3,5 ± 0,7	4183,7 ± 101,4

3.4.2 Stanovení ohybových vlastností

Ohybová zkouška dle ČSN EN ISO 178 se používá k hodnocení chování zkušební tělesa při namáhání tříbodovým ohybem. S její pomocí lze určit pevnost v ohybu i další závislosti mezi napětím a deformací při stanovených podmínkách.

Podstata zkoušky spočívá v tom, že zkušební těleso obdélníkového průřezu je umístěno na dvou podpěrách a konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se zkušební těleso nezlomí na svém vnějším povrchu, nebo dokud deformace nedosáhne hodnoty 5 %, podle toho, který případ nastal dříve [38].

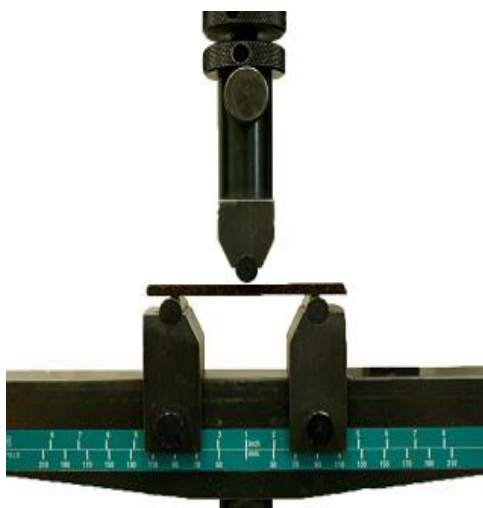
Zkušební tělesa o rozměrech 80 x 10 x 4 mm (viz obr. 3.11) byla zhotovena obrobením ze střední části víceúčelového tělesa v souladu s ISO 20753 a volně položena na dvě podpory (viz obr. 3.12) a zatěžována přítláčným trnem (viz obr. 3.13), který působil na těleso rychlostí 2 mm/min. Trn působil na těleso do doby, než bylo dosaženo předem stanovené hodnoty průhybu, resp. deformace za mezí pevnosti v ohybu. Vzhledem k povaze materiálu nebylo dosaženo okamžiku lomu. Zkouška opět probíhala na zkušebním stroji Hounsfield H 10 KT se snímací hlavou měřící do velikosti síly 500 N a se softwarem QMAT. Zkoušeno bylo pět zkušebních těles a během zkoušky se získávala závislost napětí na deformaci (viz Příloha 2). Výsledné hodnoty napětí v ohybu a vypočtené hodnoty modulu pružnosti v ohybu (stanoveného z hodnot napětí a průhybu odpovídají daným hodnotám deformace ohybem 0,05 % a 0,25 %) jsou uvedeny v tab. 3.4.



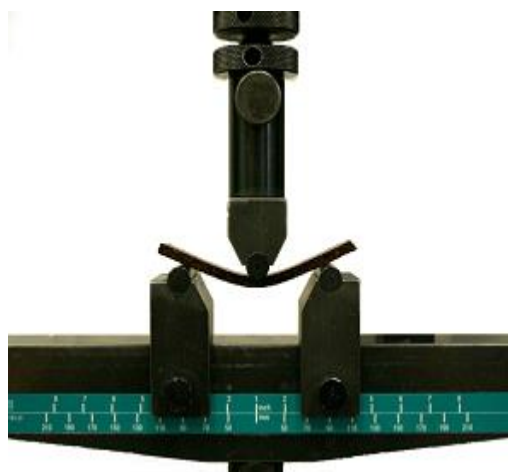
Obr. 3.11 Rozměry zkušební tělesa dle ČSN EN ISO 178 [38]

Tab. 3.4 Ohybové vlastnosti PLA kompozitů

Kompozit / typ vláken		modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]	pevnost v ohybu σ_{fM} [MPa]
čisté PLA		3168,0 ± 115,4	91,9 ± 3,0
ramie	10%	3609,0 ± 20,1	86,8 ± 0,8
	20%	3822,0 ± 86,4	76,9 ± 8,8
	30%	4284,0 ± 20,1	84,9 ± 1,0
vlna	10%	3436,5 ± 33,7	69,5 ± 0,4
	20%	3504,5 ± 36,2	48,1 ± 5,5
	30%	3497,5 ± 45,8	41,2 ± 0,6
len	10%	3504,0 ± 91,0	90,5 ± 1,6
	20%	3474,0 ± 386,3	88,2 ± 0,8
	30%	3825,0 ± 63,6	86,1 ± 0,8
sója	10%	3330,0 ± 31,8	87,5 ± 1,5
	20%	3384,0 ± 49,3	87,1 ± 1,1
	30%	3492,0 ± 32,5	89,5 ± 1,2
banán	10%	3603,0 ± 58,5	89,7 ± 0,9
	20%	4107,0 ± 90,2	90,2 ± 1,3
	30%	4650,0 ± 34,6	92,0 ± 0,8
bambus	10%	3387,0 ± 30,7	90,7 ± 0,9
	20%	3456,0 ± 68,4	91,5 ± 1,6
	30%	3672,0 ± 50,2	94,9 ± 1,2
bavlna	10%	3477,0 ± 37,3	89,7 ± 0,8
	20%	3732,0 ± 32,5	89,4 ± 0,6
	30%	3978,0 ± 78,2	91,0 ± 0,8
konopí	10%	3408,0 ± 26,8	92,8 ± 0,3
	20%	3618,0 ± 40,2	88,9 ± 0,5
	30%	3906,0 ± 58,7	80,3 ± 12,5



Obr.3.12 Zkušební těleso před zatížením



Obr. 3.13 Zkušební těleso při zatížení

3.4.3 Stanovení rázové houževnatosti Charpy

Metoda Charpy je vhodná ke zkoumání rázového chování zkušebních těles za definovaných podmínek rázu a k posouzení křehkosti či houževnatosti zkušebních těles [39].

Rázové vlastnosti kompozitních výstřiků byly stanoveny dle ČSN EN ISO 179-1 na rázovém kladivu CEAST Resil 5.5 (viz obr. 3.14). Před začátkem zkoušky bylo nutné zařízení kalibrovat, zadat vstupní parametry zkoušky a zjistit ztrátovou energii kladiva mechanickým třením a odporem vzduchu při volném pádu kladiva (tzv. ráz naslepo bez zkušebního tělesa). Při samotné zkoušce bylo zkušební těleso umístěné vodorovně na podpěrách a přeráženo úderem rázového kladiva, přičemž směr rázu byl veden středem vzdálenosti mezi podpěrami. Směr rázu byl veden na užší stranu (metoda ISO 179-1/1eU) a zaznamenávána byla energie potřebná pro přeražení zkušebního tělesa, z níž byla vypočtena výsledná rázová houževnatost kompozitního vzorku. Hodnocení rázové houževnatosti probíhalo při teplotě standardního prostředí 23 °C a u vzorků temperovaných na teplotu -35 °C. Chlazení proběhlo v laboratorní chladničce ProfiMaster PMU 0450 a tělesa byla ihned po vyjmutí přerážena. Zkoušeno bylo 10 zkušebních těles a výsledky jsou uvedeny v tab. 3.5.



Obr. 3.14 Zkušební zařízení CEAST Resil 5.5

Tab. 3.5 Rázová houževnatost Charpy PLA kompozitů

Kompozit / typ vláken		teplota	
		23°C	-35°C
		rázová houževnatost a_{CU} [kJ/m ²]	rázová houževnatost a_{CU} [kJ/m ²]
čistě PLA		18,8 ± 2,3	25,1 ± 2,5
ramie	10%	14,0 ± 2,5	16,8 ± 1,5
	20%	14,2 ± 1,0	16,9 ± 1,1
	30%	15,2 ± 0,4	17,5 ± 1,3
vlna	10%	11,7 ± 1,8	14,9 ± 2,0
	20%	11,7 ± 2,2	11,1 ± 2,7
	30%	10,7 ± 1,0	9,3 ± 1,0
len	10%	16,8 ± 0,8	20,2 ± 1,4
	20%	17,2 ± 1,4	22,2 ± 1,5
	30%	16,4 ± 2,2	20,0 ± 1,0
sója	10%	17,0 ± 0,7	21,1 ± 1,8
	20%	15,2 ± 2,6	19,5 ± 4,4
	30%	16,7 ± 0,9	21,1 ± 1,4
banán	10%	15,2 ± 1,0	19,8 ± 0,6
	20%	14,8 ± 1,6	16,1 ± 1,7
	30%	14,5 ± 1,6	17,1 ± 1,3
bambus	10%	18,5 ± 2,2	21,6 ± 1,8
	20%	16,8 ± 3,3	19,2 ± 2,5
	30%	19,7 ± 1,0	23,4 ± 1,2
bavlna	10%	18,4 ± 1,4	19,3 ± 2,2
	20%	20,0 ± 1,2	17,8 ± 1,9
	30%	20,4 ± 2,0	22,5 ± 1,6
konopí	10%	15,7 ± 1,7	20,0 ± 2,1
	20%	16,7 ± 1,8	18,3 ± 1,6
	30%	17,1 ± 2,9	17,1 ± 2,5

4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH DISKUZE

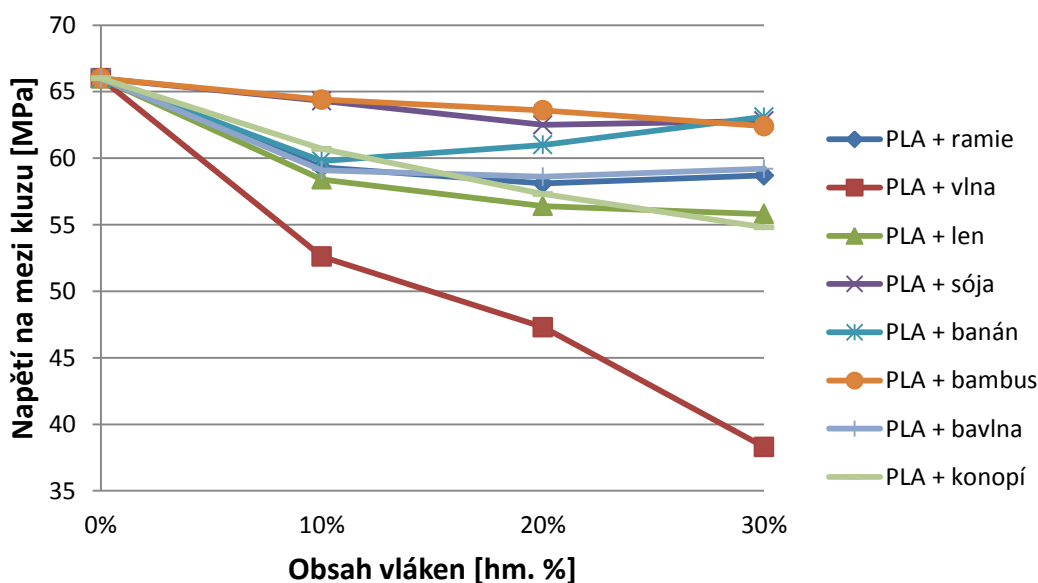
Z naměřených hodnot pro ohybovou, tahovou a rázovou zkoušku byly sestrojeny grafické závislosti měřených vlastností PLA kompozitů v závislosti na množství a typu použitých přírodních vláken, které jsou diskutovány v následujících kapitolách.

4.1 Vyhodnocení tahových vlastností

Při hodnocení tahových vlastností PLA kompozitů byl posuzován vliv typu a množství přírodních vláken na hodnoty napětí na mezi kluzu, poměrné prodloužení při přetržení (celkovou tažnost) a modul pružnosti v tahu, stanovených v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 527.

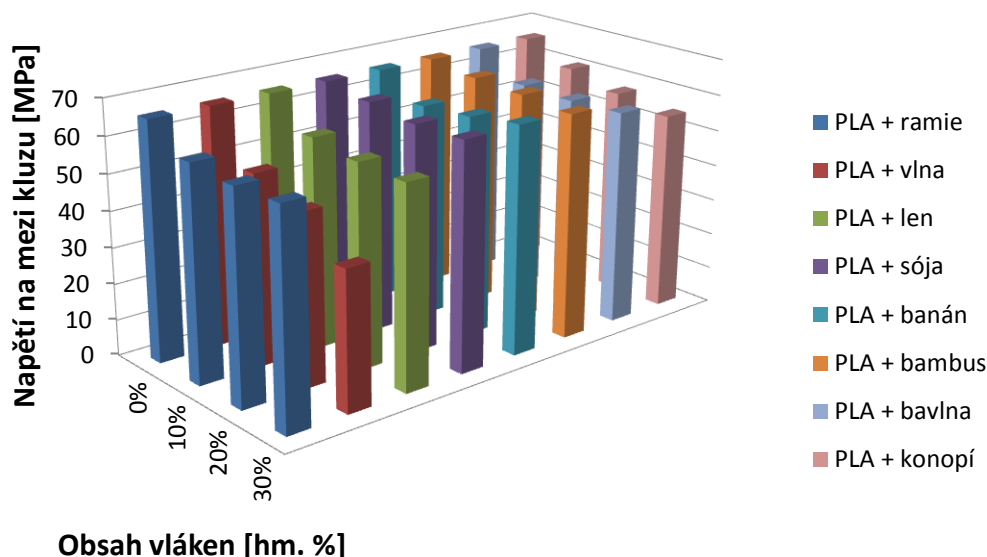
4.1.1 Napětí na mezi kluzu

Na obr. 4.1 je zobrazeno napětí na mezi kluzu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken. Jelikož na mezi kluzu bylo dosaženo maximálního napětí v tahu, jsou tyto hodnoty shodné. Z obrázku je zřejmé, že s rostoucím obsahem přírodních vláken napětí na mezi kluzu klesá. Největší pokles byl zaznamenán u kompozitu PLA s vlákny vlny, naopak nejmenší pokles je vidět u kompozitů PLA s vlákny bambusu, banánu



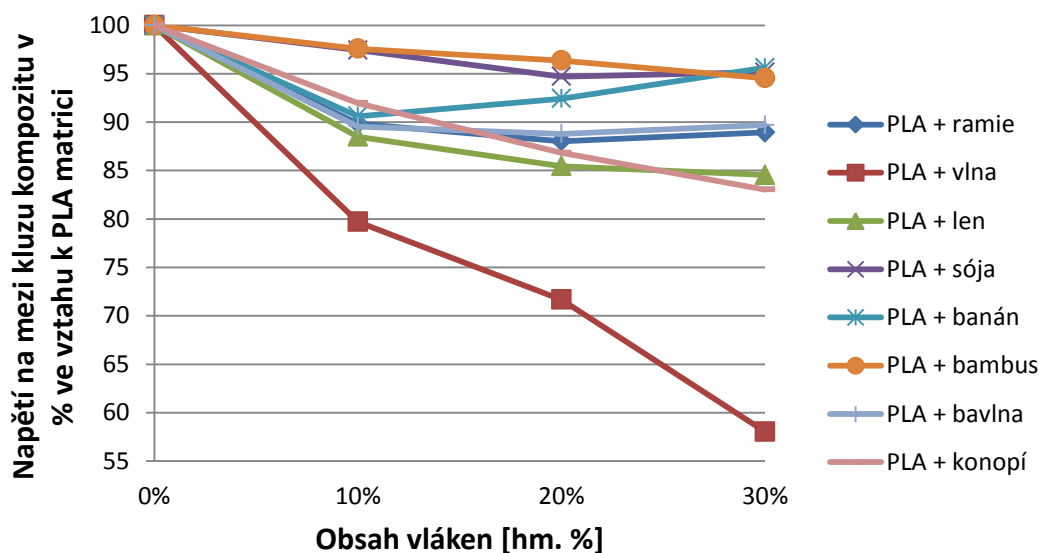
Obr. 4.1 Napětí na mezi kluzu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken

a sóji. Pro větší přehlednost je uveden i obr. 4.2, který taktéž zobrazuje napětí na mezi kluzu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken, ale je sestaven pomocí sloupcového grafu.



Obr. 4.2 Napětí na mezi kluzu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken

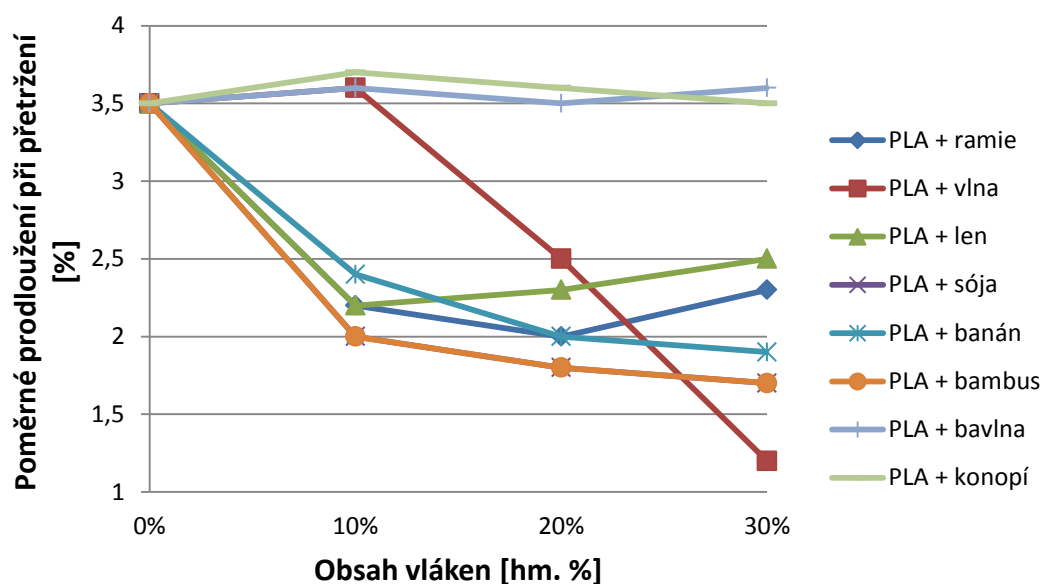
Na obrázku 4.3 je zobrazeno o kolik procent se naměřené hodnoty PLA kompozitů s přírodními vlákny změnily oproti čistému PLA polymeru. Nejvýraznější pokles napětí na mezi kluzu, zaznamenaný u kompozitu s vlákny vlny, představuje postupně pokles hodnoty na 80 %, 72 % a 58 % původní meze s rostoucím obsahem vláken v PLA matrici 10 hm. %, 20 hm. % a 30 hm. %.



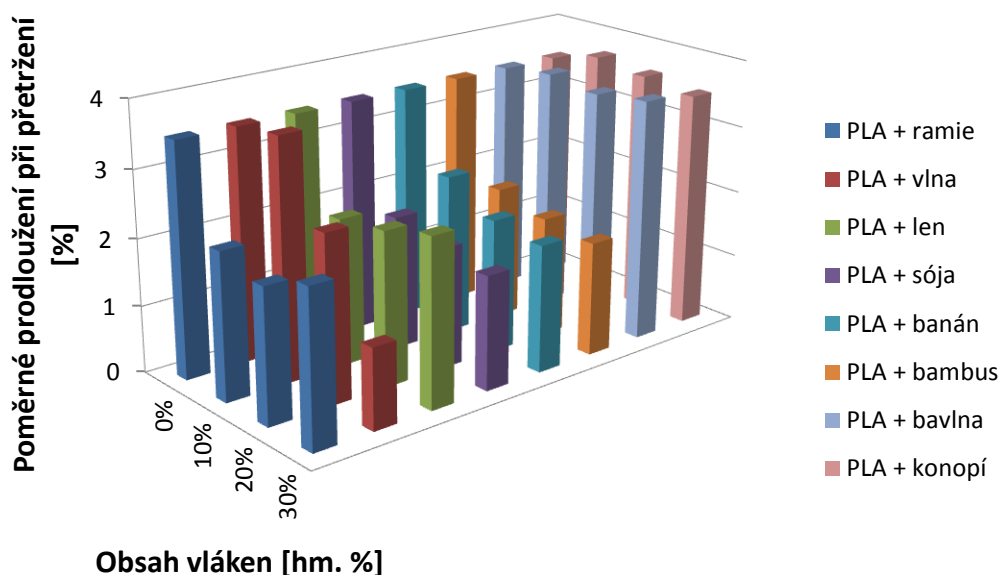
Obr. 4.3 Procentuální vyjádření napětí na mezi kluzu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken

4.1.2 Poměrné prodloužení při přetržení

Rovněž tak poměrné prodloužení při přetržení je pro přehlednost zobrazeno na obr. 4.4 a obr. 4.5 v závislosti na množství a typu přírodních vláken. Opět nejvíce poklesl kompozit PLA s vlákny vlny, ale také bambusu, banánu, ramie a lnu. U kompozitů PLA s vlákny konopí a bavlny lze konstatovat, že použití vláken neovlivnilo celkovou tažnost kompozitního výstřiku (s ohledem na rozptyl měřených hodnot).

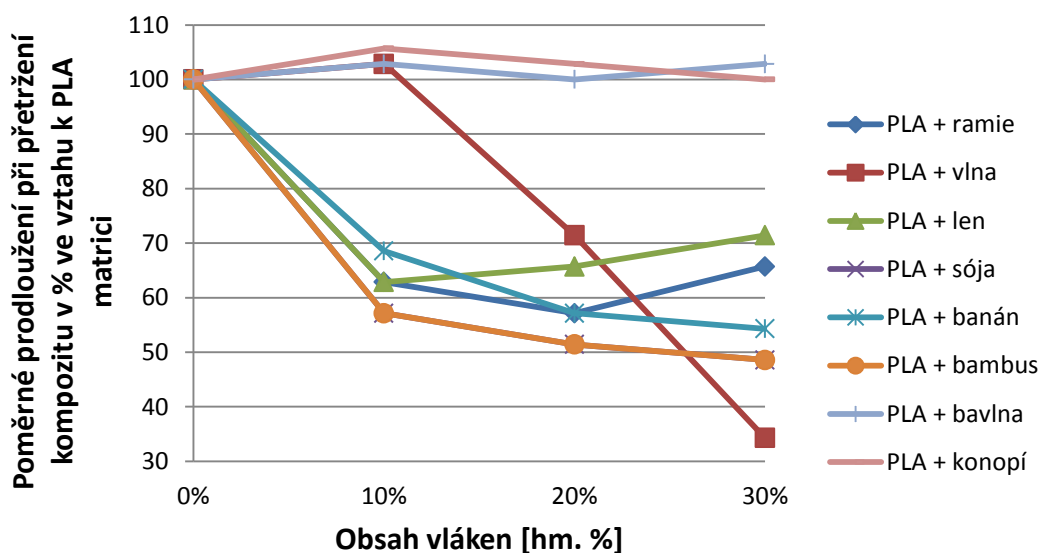


Obr. 4.4 Poměrné prodloužení při přetržení PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken



Obr. 4.5 Poměrné prodloužení při přetržení PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken

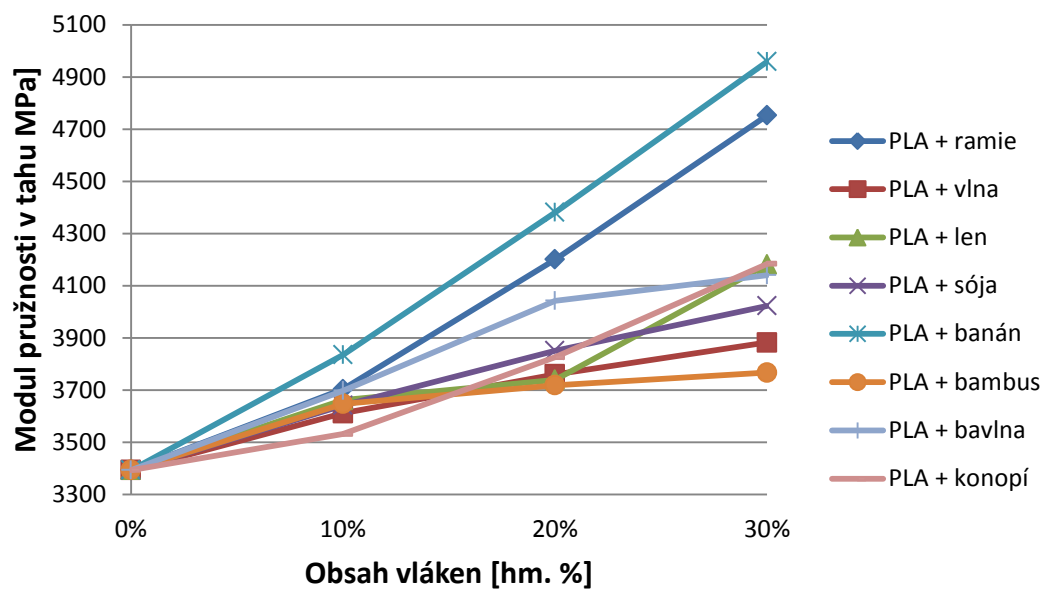
Stejně jako na obr. 4.3 je na obr. 4.6 zobrazeno o kolik procent se naměřené hodnoty PLA kompozitů s přírodními vlákny změnily oproti čistému PLA polymeru.



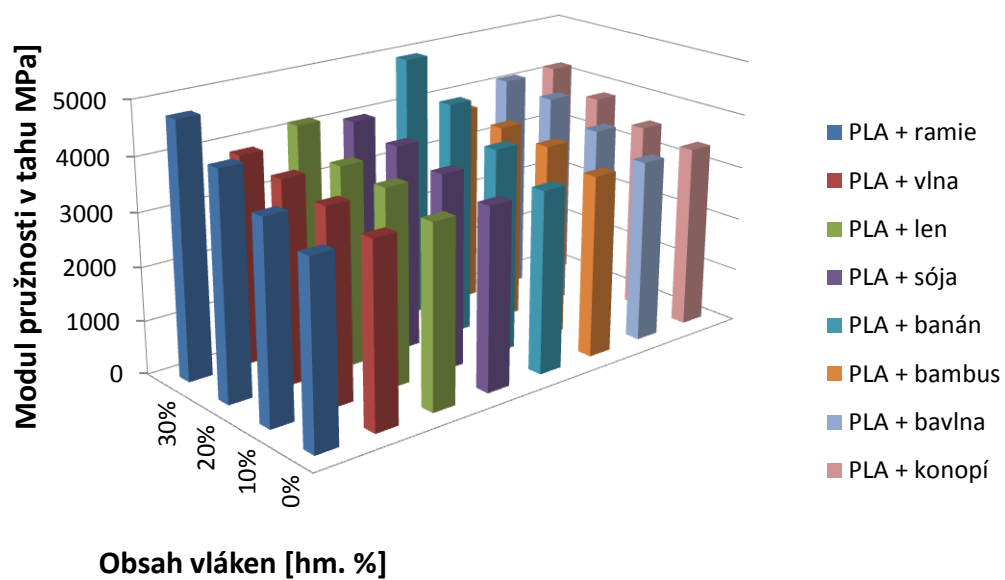
Obr. 4.6 Procentuální vyjádření poměrného prodloužení při přetržení PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken

4.1.3 Modul pružnosti v tahu

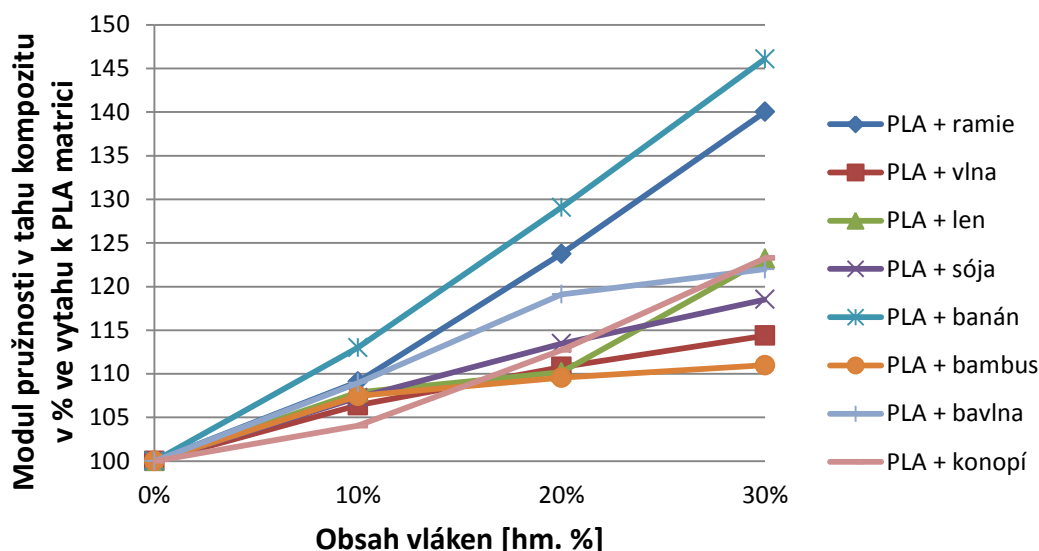
Poslední hodnocenou vlastností u zkoušky tahem byl modul pružnosti v tahu (viz obr. 4.7 a obr 4.8). Zde je vidět, jak s rostoucím obsahem přírodních vláken modul pružnosti v tahu stoupá. Nejvyšší hodnoty dosáhl kompozit PLA s vlákny banánu (následovaný kompozitem PLA s vlákny ramie). Nejnižší hodnoty dosáhl kompozit PLA s vlákny bambusu. Rozdíl modulu pružnosti v tahu u těchto kompozitů je cca 1200 MPa. Na obr. 4.9 je znázorněn nárůst hodnot modulu pružnosti v tahu PLA kompozitů s přírodními vlákny od hodnoty čistého PLA polymeru. V případě kompozitu s banánovými vlákny se modul pružnosti s přidavkem vláken (10 hm. %, 20 hm. %, resp. 30 hm. %) postupně zvýšil o 13 %, 29 %, resp. 46 %.



Obr. 4.7 Modul pružnosti v tahu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken



Obr. 4.8 Modul pružnosti v tahu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken



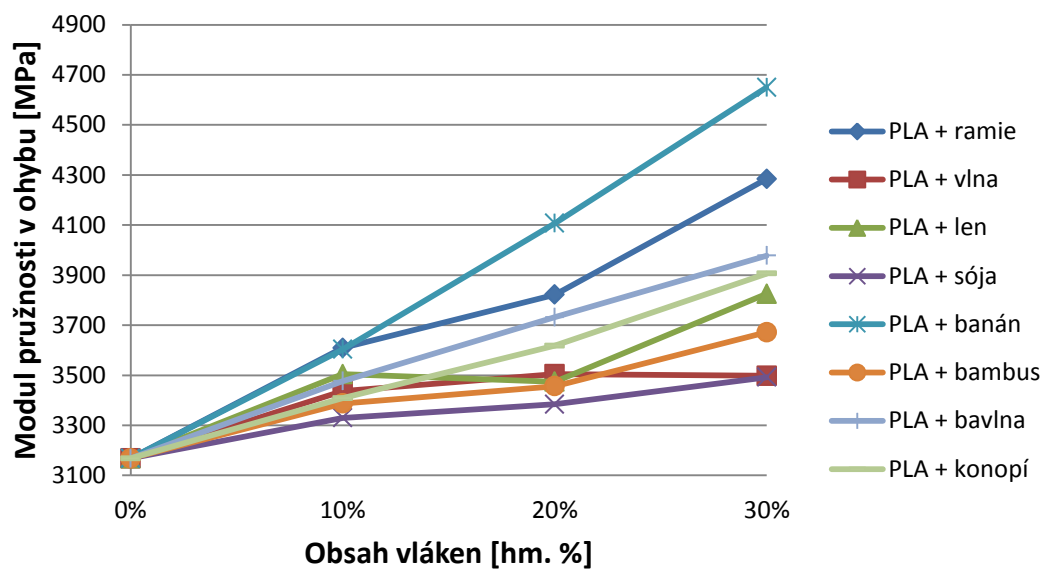
Obr. 4.9 Procentuální vyjádření modulu pružnosti v tahu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken

4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností

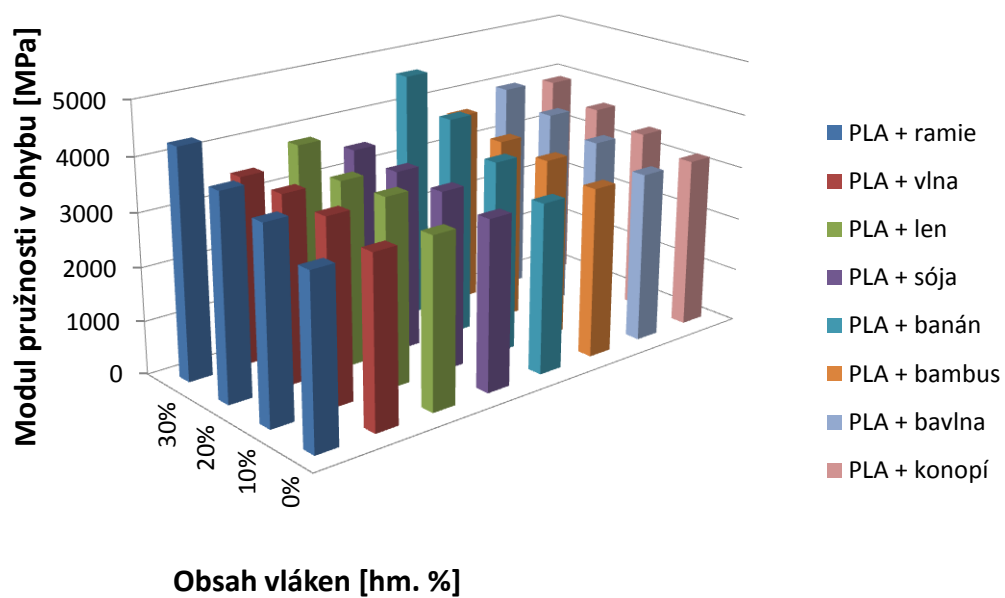
Při hodnocení ohybových vlastností PLA kompozitů byl posuzován vliv typu a množství přírodních vláken na hodnoty modulu pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu, stanovených v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 178.

4.2.1 Modul pružnosti v ohybu

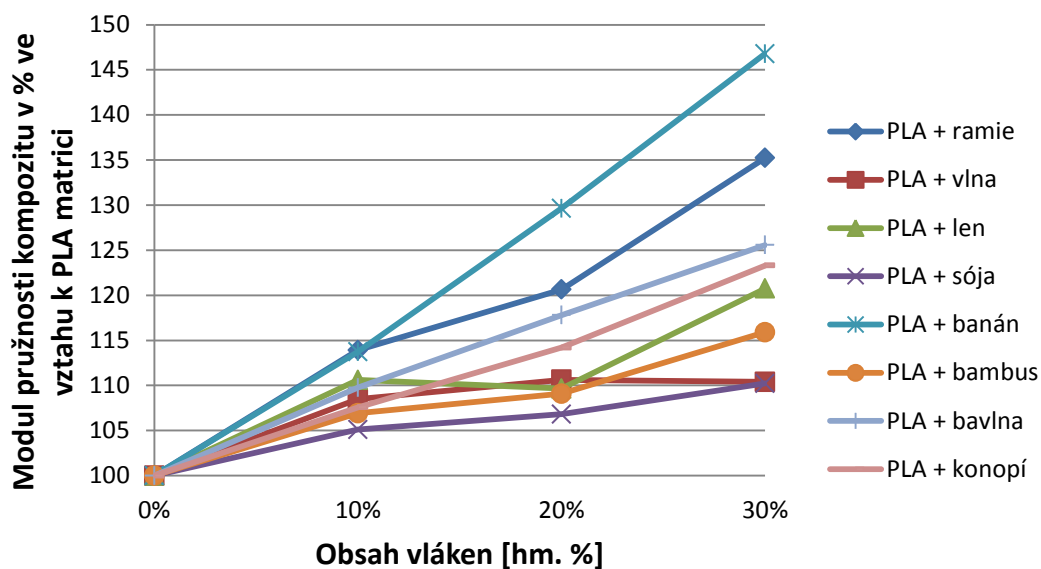
Na obr. 4.10 a obr. 4.11 je zobrazeno, jak je modul pružnosti v ohybu kompozitního materiálu ovlivňován přírodními vlákny, s jejichž rostoucím obsahem dochází k jeho růstu. Největšího modulu pružnosti dosáhl kompozit PLA s banánovými vlákny, nejmenší změna je zaznamenána u PLA kompozitu s vlákny sóji. Přestože většina PLA kompozitů při 30 hm. % obsahu přírodních vláken má hodnoty E_f v rozmezí hodnot 3490 MPa ÷ 3980 MPa, PLA s vlákny banánu dosáhl hodnoty 4650 MPa. I zde je na obr. 4.12 uvedeno grafické znázornění procentuálního vzrůstu modulu pružnosti v ohybu v závislosti na obsahu přírodních vláken, kde je možné vidět, že u PLA s vlákny banánu oproti čistému PLA došlo k růstu modulu pružnosti v ohybu o 46 % a u PLA s vlákny vlny a PLA s vlákny sóji pouze o 10 %.



Obr. 4.10 Modul pružnosti v ohybu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken



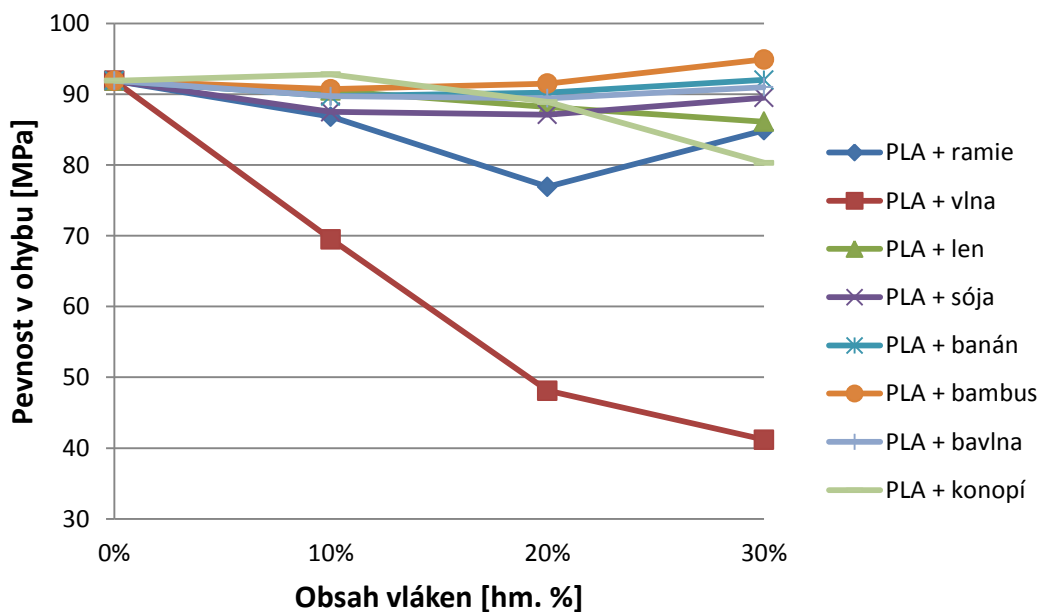
Obr. 4.11 Modul pružnosti v ohybu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken



Obr. 4.12 Procentuální vyjádření modulu pružnosti PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken

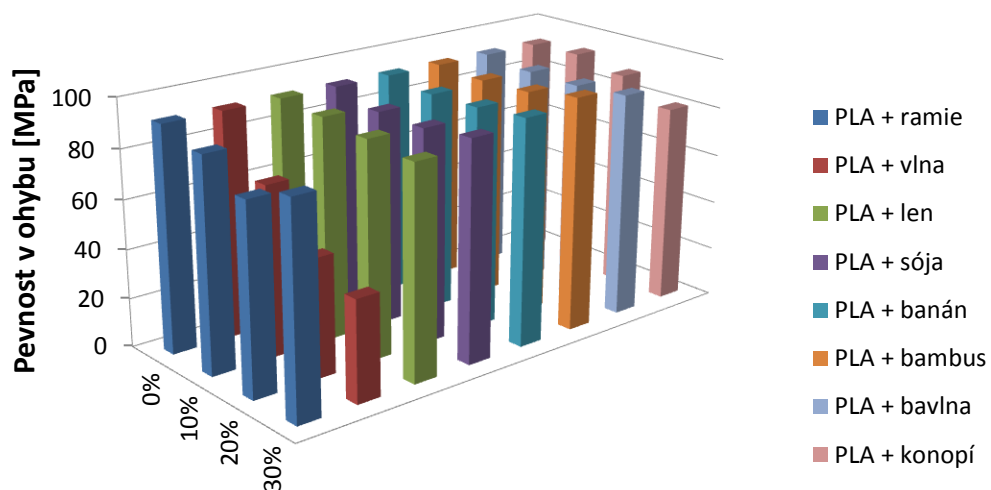
4.2.2 Pevnost v ohybu

Další vlastností, která se při provádění experimentálního měření hodnotila, byla pevnost v ohybu. Z grafického znázornění na obr. 4.13 a obr. 4.14 vyplývá, že pevnost v ohybu je téměř stejná u všech PLA kompozitů s přírodními vlákny, kromě PLA kompozitu s vlákny vlny, kde se pevnost



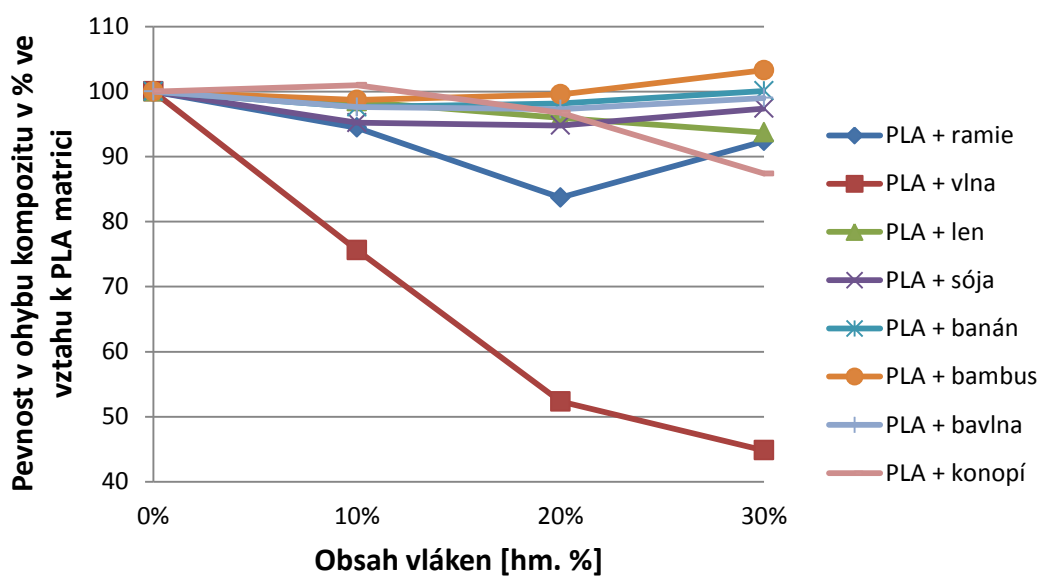
Obr. 4.13 Pevnost v ohybu PLA kompozitů v závislosti na množství a typu přírodních vláken

v ohybu postupně s rostoucím obsahem vláken výrazně snižuje na hodnotu 76 %, 52 %, resp. 45 % původní hodnoty PLA matrice (viz obr. 4.15).



Obsah vláken [hm. %]

Obr. 4.14 Pevnost v ohybu PLA kompozitů
v závislosti na množství a typu přírodních vláken



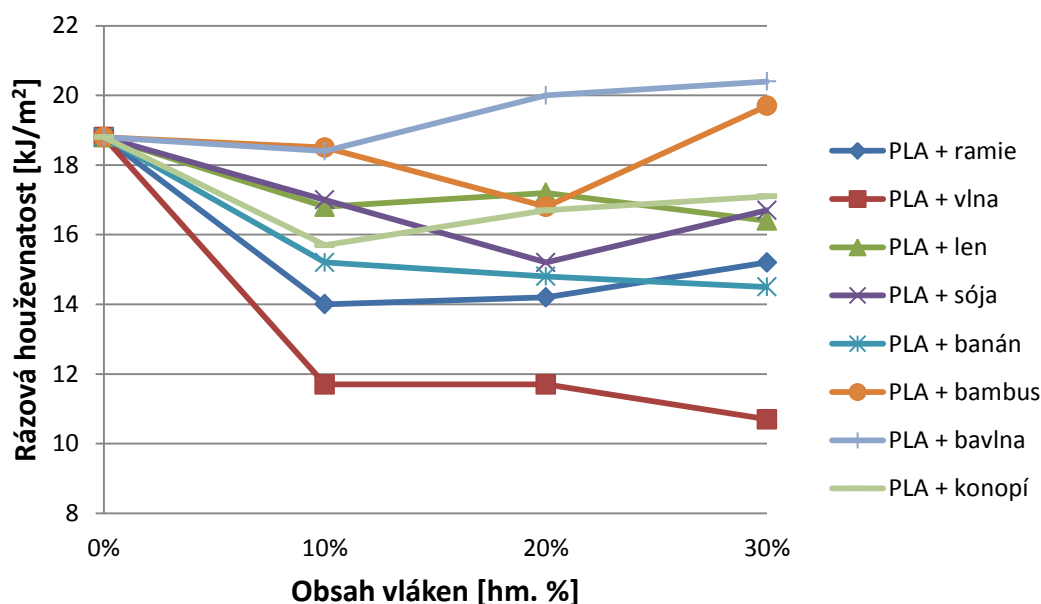
Obr. 4.15 Procentuální vyjádření pevnosti v ohybu PLA kompozitů
v závislosti na množství a typu přírodních vláken

4.3 Vyhodnocení rázové houževnatosti

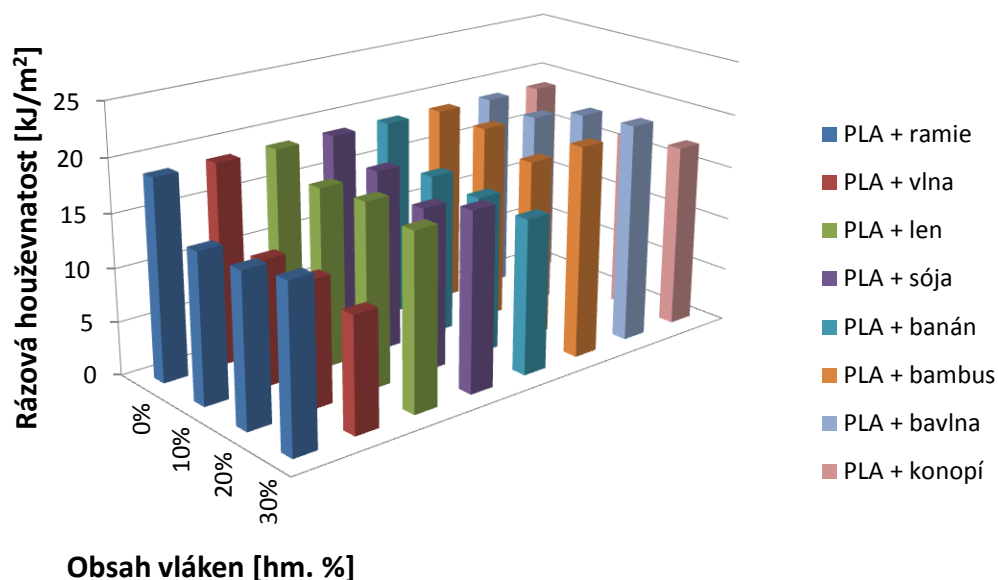
Vyhodnocení rázové houževnatosti kompozitů v závislosti na typu a množství přírodních vláken při standardní teplotě 23 °C a při teplotě pod bodem mrazu -35 °C je zřejmé z obr. 4.16 a obr. 4.19, resp. z obr. 4.17 a obr. 4.20.

- Rázová houževnatost při 23 °C

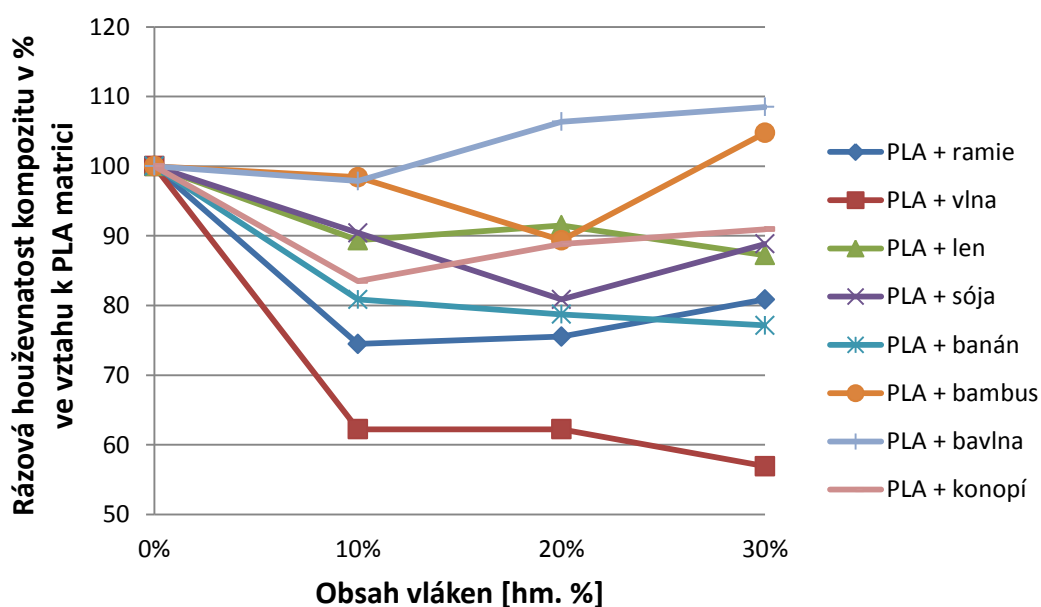
U rázové houževnatosti při teplotě 23 °C je vidět, že rázová houževnatost čistého PLA materiálu je 18,8 kJ/m² a tuto hodnotu nepřekročil skoro žádný kompozit s přírodními vlákny, neboť všechny křivky klesají. Největšího poklesu rázové houževnatosti opět dosáhl kompozit PLA s vlákny vlny. Procentuální pokles je zobrazen na obr. 4.18. Drobné výchyly nad hodnotu 18,8 kJ/m² u kompozitu PLA s vlákny bavlny a bambusu lze přisoudit rozptylu měřených hodnot.



Obr. 4.16 Rázová houževnatost PLA kompozitů při teplotě 23 °C v závislosti na množství a typu přírodních vláken



Obr. 4.17 Rázová houževnatost PLA kompozitů při teplotě 23 °C v závislosti na množství a typu přírodních vláken

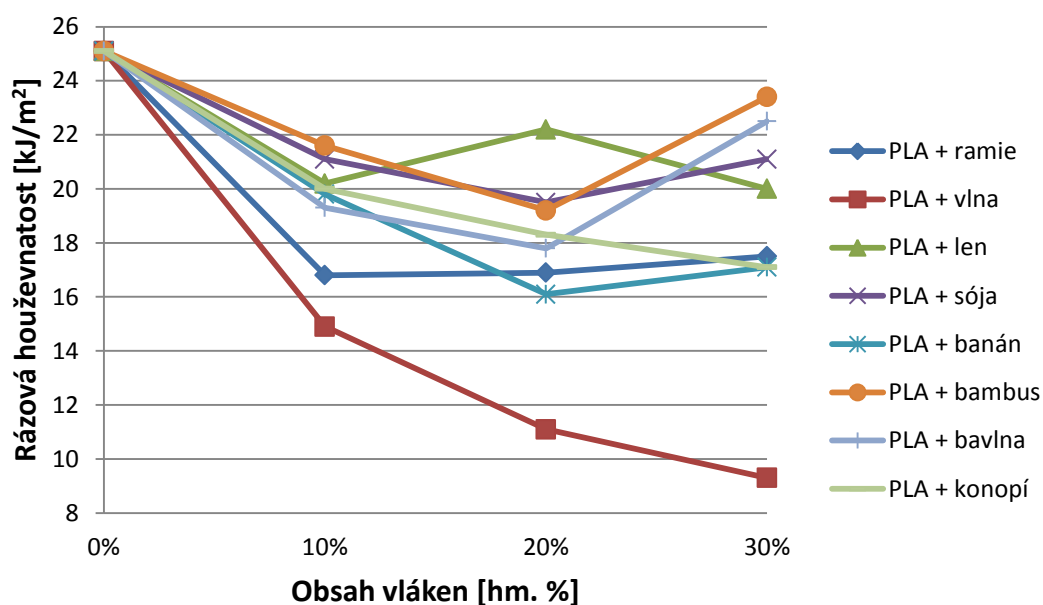


Obr. 4.18 Procentuální vyjádření rázové houževnatosti PLA kompozitů při teplotě 23 °C v závislosti na množství a typu přírodních vláken

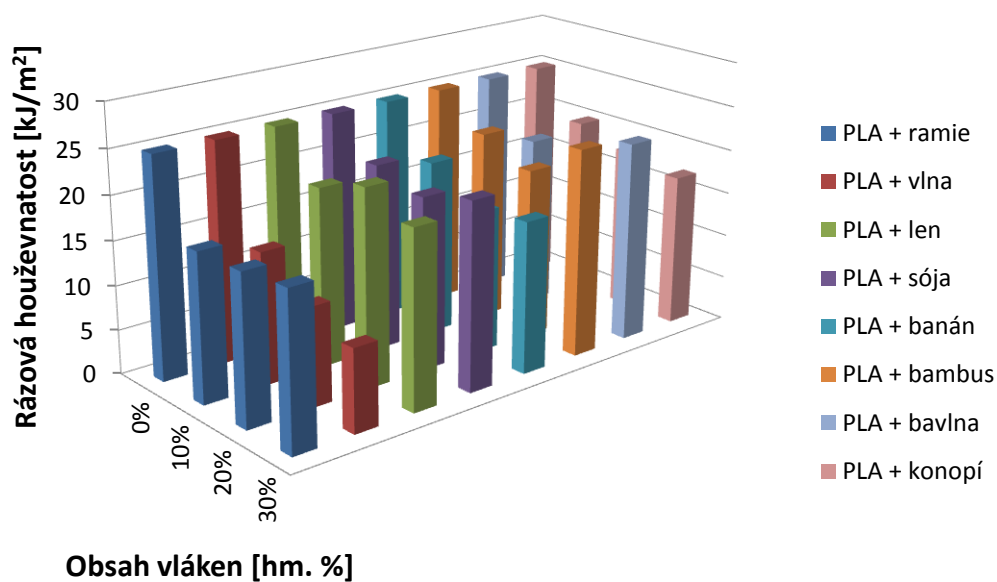
- Rázová houževnatost při -35 °C

U rázové houževnatosti PLA kompozitů s přírodními vlákny při teplotě -35 °C je zřejmé, že i zde dochází u všech typů kompozitů hodnot k poklesu rázové houževnatosti a podle očekávání má nejmenší hodnotu rázové houževnatosti opět kompozit PLA s vlákny vlny. Procentuální pokles je

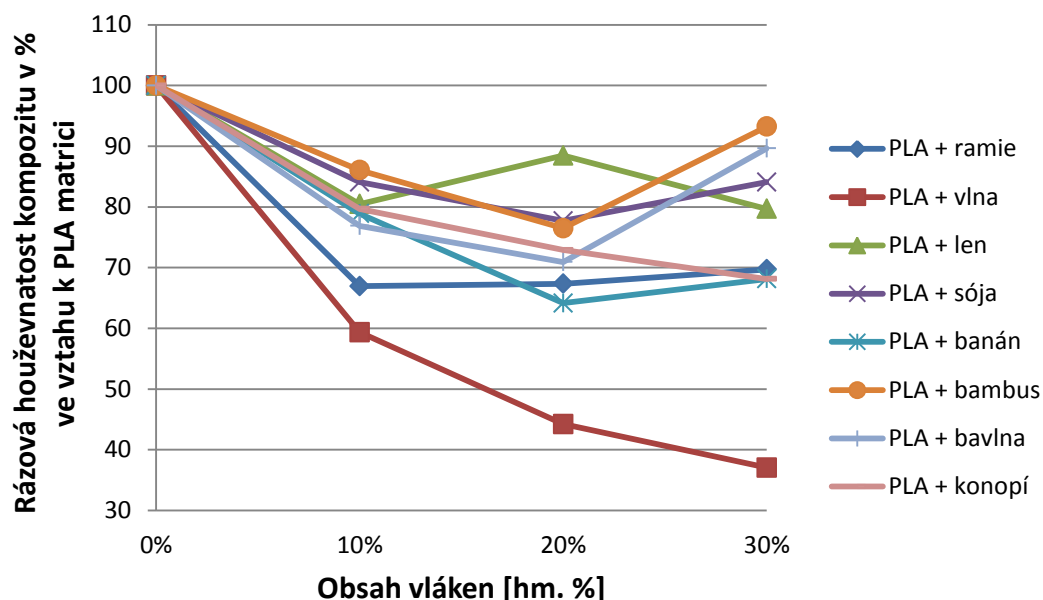
zobrazen na obr. 4.21, kde je možné vyčíst, že kompozit PLA s vlákny vlny klesl o 63 %.



Obr. 4.19 Rázová houževnatost PLA kompozitů při teplotě -35 °C v závislosti na množství a typu přírodních vláken



Obr. 4.20 Rázová houževnatost PLA kompozitů při teplotě -35 °C v závislosti na množství a typu přírodních vláken



Obr. 4.21 Procentuální vyjádření rázové houževnatosti PLA kompozitů při teplotě -35 °C v závislosti na množství a typu přírodních vláken

Při porovnání grafických závislostí pro rázovou houževnatost při teplotě 23 °C na obr. 4.16 (resp. obr. 4.17) a při teplotě -35 °C na obr. 4.19 (resp. obr. 4.20) je vidět, že se rázová houževnatost PLA kompozitu s přírodními vlákny s teplotou výrazně neliší (na rozdíl od kompozitů s polypropylenovou maticí [36]). Tento fakt má za následek teplota zesklenní, která se u PLA matrice pohybuje v rozmezí 55 °C až 60 °C (viz tab. 3.1). Obě teploty, při kterých byla rázová houževnatost měřena, jsou pod teplotou skelného přechodu, i když je mezi nimi teplotní rozdíl 58 °C, tak nemá téměř žádný vliv.

5 ZÁVĚR

V posledních několika letech jsou od společnosti znát velké nároky na ochranu životního prostředí. Více se hlídá, jaký odpad se skladuje, jestli je dobře skladován a také jestli by nešel znovu použít. Vzhledem k neustálému hromadění plastového odpadu na skládkách je snahou nahradit běžné syntetické polymerní kompozity materiály biologicky odbouratelnými. Velkou výhodou biodegradabilních polymerů je schopnost biologického rozkladu, při kterém nevznikají vůbec žádné nebezpečné látky pro životní prostředí. Také se využívají přírodní vlákna, která nahrazují plniva syntetická a to vše s cílem zachování nebo zlepšení užitných vlastností materiálu a snížení závislosti na fosilních surovinách.

Předložená bakalářská práce se zabývá studiem pevnostních a rázových charakteristik biodegradovatelných PLA kompozitů s rostlinnými a živočišnými vlákny. Tyto mechanické vlastnosti byly hodnoceny pomocí tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 527, pomocí ohybové zkoušky dle ČSN EN ISO 178 a rázové zkoušky dle ČSN EN ISO 179 - 1. Pro účel hodnocení byly sestrojeny grafické závislosti, které zobrazují vliv typu a množství přírodních vláken na mechanické vlastnosti kompozitu.

Z vyhodnocení experimentální části bakalářské práce je vidět, že s přibývajícím množstvím přírodních vláken klesá napětí na mezi kluzu a klesá poměrné prodloužení při přetržení, resp. celková tažnost kompozitu. Naopak stoupá modul pružnosti v tahu a modul pružnosti v ohybu. Zajímavé je, že na pevnost v ohybu nemají přírodní vlákna téměř žádný vliv (výjimkou jsou vlákna vlny). Vzhledem k zamýšlené aplikaci kompozitů PLA s přírodními vlákny v automobilovém průmyslu, byla měřena rázová houževnatost pro 23 °C ale i -35 °C. Z vyhodnocení je zřejmé, že s přibývajícím množstvím přírodních vláken v PLA kompozitu rázová houževnatost pro obě teploty klesá. Současně si lze povšimnout, že teplota - 35 °C nemá na výslednou rázovou houževnatost výrazný vliv vzhledem k teplotě zesklnění, která je u PLA kompozitů v rozsahu cca 50 °C ÷ 60 °C. Pokud by ale byly tyto výsledné křivky rázové houževnatosti porovnány s výslednými křivkami rázové houževnatosti pro kompozit s polypropylenovou matricí, byl by v nich podstatný rozdíl, jelikož polypropylen

má teplotu skelného přechodu cca $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, viz výsledky výzkumu katedry strojírenské technologie [36]. U většiny vyhodnocovaných vlastností vykazoval největší odchylku od čistého PLA polymeru kompozit PLA s vlákny živočišného původu, resp. vlákny vlny.

Literatura

- [1] <http://www.mmspektrum.com/clanek/precizni-vyroba-forem.html> (květen 2013)
- [2] KROISOVÁ, D.: *Biodegradovatelné polymery – úvod do problematiky*. Liberec: TU v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-468-9.
- [3] BORŮVKA, M.: *Hodnocení vlastností kompozitu s PP matricí a celulózovým plnivem*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2012.
- [4] ŠTROS, L.: *Regenerace lakovaných dílů z PP*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2007.
- [5] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: VUT, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [6] <http://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-a-kompozity-naplnuji-materialove-pozadavky-moderniho-strojirens.html> (květen 2013)
- [7] DOLENSKÝ, O.: *Třecí vlastnosti kompozitu z polypropylenu vyztuženého přírodními vlákny*. Bakalářská práce. Liberec: TU v Liberci, 2012.
- [8] BAREŠ, R. A.: *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL, 1988.
- [9] KRATOCHVÍL, B.; ŠVORČÍK, V.; VOJTĚCH, D.: *Úvod do studia materiálů*. Praha: VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [10] BHAGWAN D. AGARWAL; LAWRENCE J. BROUTMAN: *Vláknové kompozity*. Praha: STNL 1987.
- [11] http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf (březen 2013)
- [12] http://umi.fs.cvut.cz/files/6_kompozitni-materialy.pdf (březen 2013)
- [13] http://cs.wikipedia.org/wiki/Matrice_vl%C3%A1knov%C3%BDch_kompozit%C5%AF (březen 2013)
- [14] <http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf> (březen 2013)
- [15] <http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/15%20KAPITOLA%2013.pdf> (březen 2013)

- [16] STEIDL, J.: *Plasty a kompozity naplňují materiálové inženýrství požadavky moderního strojírenství*. MM Průmyslové spektrum, č. 1, 2, 2005. ISSN 1212 2572
- [17] http://www.zaverky.estranky.cz/clanky/zboziznalstvi---prumyslove-zbozi-prvni-r-_studijni-materialy_/13_--hodina-textilni-vlakna_-prirodni-rostlinna-vlakna-a-zivocisna-vlakna.html (březen 2013)
- [18] MILITKÝ, J.: *Textilní vlákna klasická a speciální*. Liberec: TU v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [19] http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/20061005/6-rostlinna_vlakna.pdf (březen 2013)
- [20] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Len> (březen 2013)
- [21] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ramie> (březen 2013)
- [22] http://cs.wikipedia.org/wiki/Konopn%C3%A9_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kno (březen 2013)
- [23] http://cs.wikipedia.org/wiki/System_tex (březen 2013)
- [24] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soja> (březen 2013)
- [25] <http://www.nisshinbo-textile.co.jp/english/goodidea/banana.html> (březen 2013)
- [26] http://cs.wikipedia.org/wiki/Bambusov%C3%A9_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kno (březen 2013)
- [27] <http://bamboos.cz/bambusove-vlakno> (březen 2013)
- [28] http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=109850&title=%9Eivo%E8i%9An%E1%20vl%E1kna&s_lang=2 (březen 2013)
- [29] http://cs.wikipedia.org/wiki/Ov%C4%8D%C3%AD_vlna (březen 2013)
- [30] <http://www.kht.tul.cz/items/A-BP/2010/%8Aafa%F8%EDkov%E1%20-%20V%FDzkum%20trhu%20kompozitn%EDch%20materi%E1l%F9%20v%20%C8R.pdf> (březen 2013)
- [31] <http://www.nova-institut.de/> (duben 2013)
- [32] <http://www.globalhemp.com/photo-galleries/automotive-composites.html> (březen 2013)

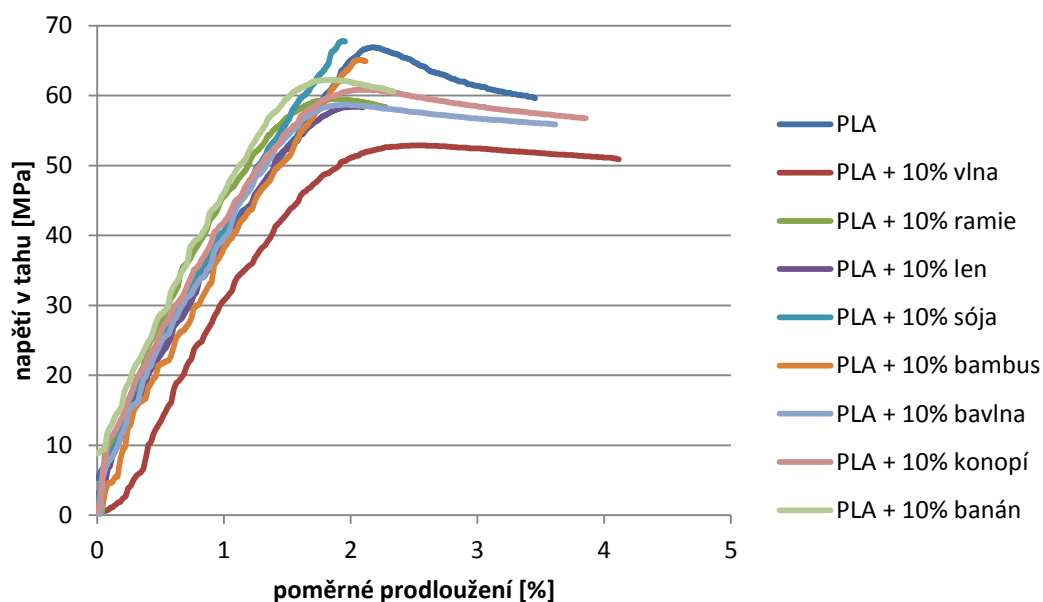
- [33] <http://www.mmspektrum.com/clanek/bananova-vlakna-na-spodky-automobilu.html> (březen 2013)
- [34] FAŠIANOK, J.: *Biologicky odbouratelné polymerní materiály*. Bakalářská práce. Liberec: TU v Liberci, 2010
- [35] http://www.natureworksllc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_3251D_injection-molding_pdf.pdf (duben 2013)
- [36] LENFELD, P. a kol.: Závěrečná zpráva o řešení projektu TA01010946, Liberec: TU v Liberci, 2011.
- [37] ČSN EN ISO 527
- [38] ČSN EN ISO 178
- [39] ČSN EN ISO 179-1

Přílohy

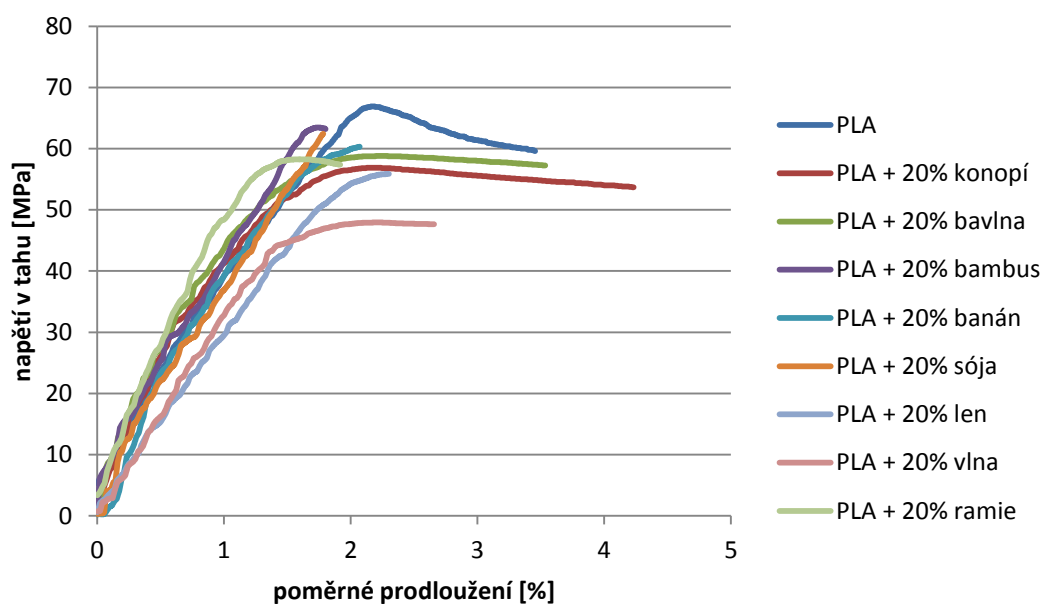
Příloha 1: Grafické závislosti napětí v tahu na poměrném prodloužení u PLA kompozitu s přírodními vlákny

Příloha 2: Grafické závislosti napětí v ohybu na deformaci u PLA kompozitu s přírodními vlákny

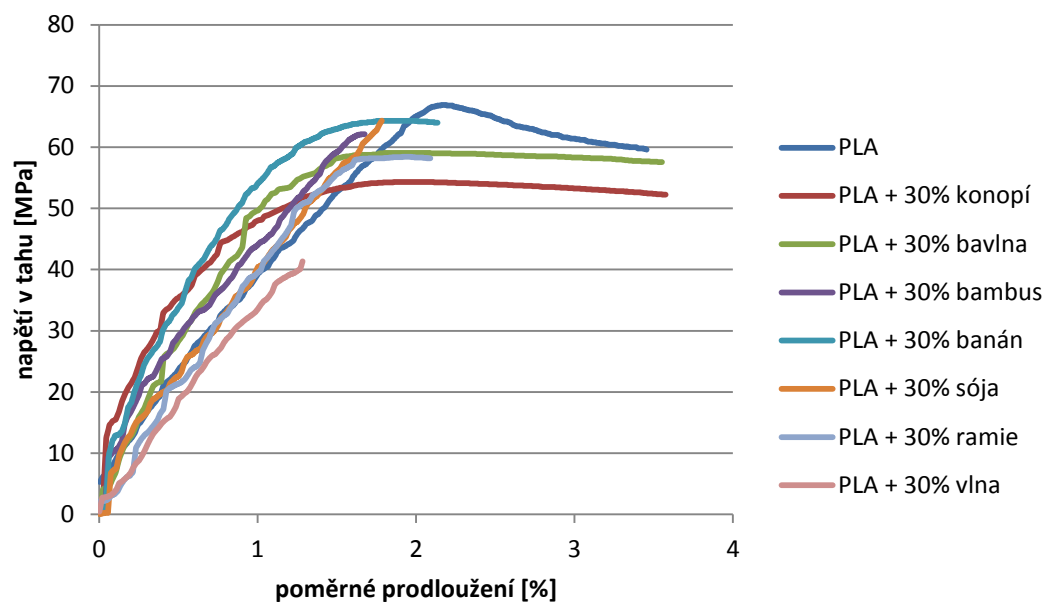
Příloha 1



Obr. P1 Závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení PLA kompozitu s obsahem 10 % přírodních vláken

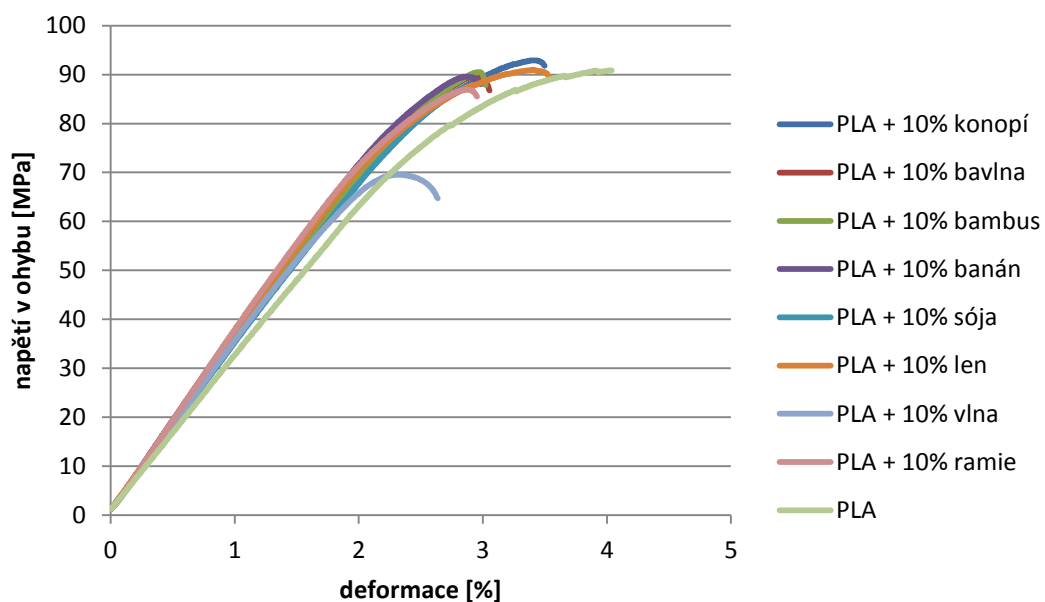


Obr. P2 Závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení PLA kompozitu s obsahem 20 % přírodních vláken

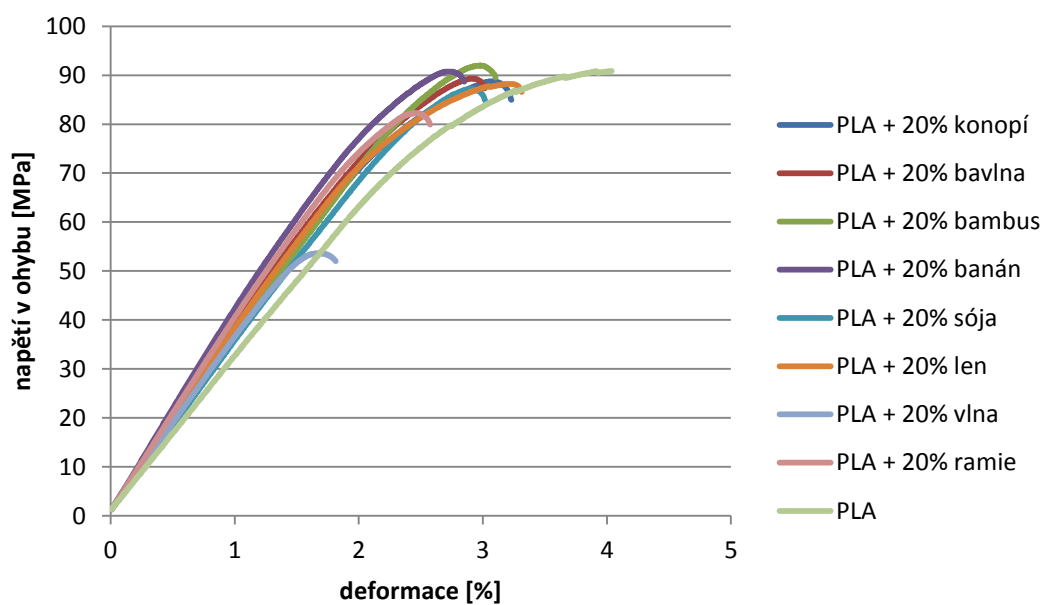


Obr. P3 Závislost napětí v tahu na poměrném prodloužení PLA kompozitu s obsahem 30 % přírodních vláken

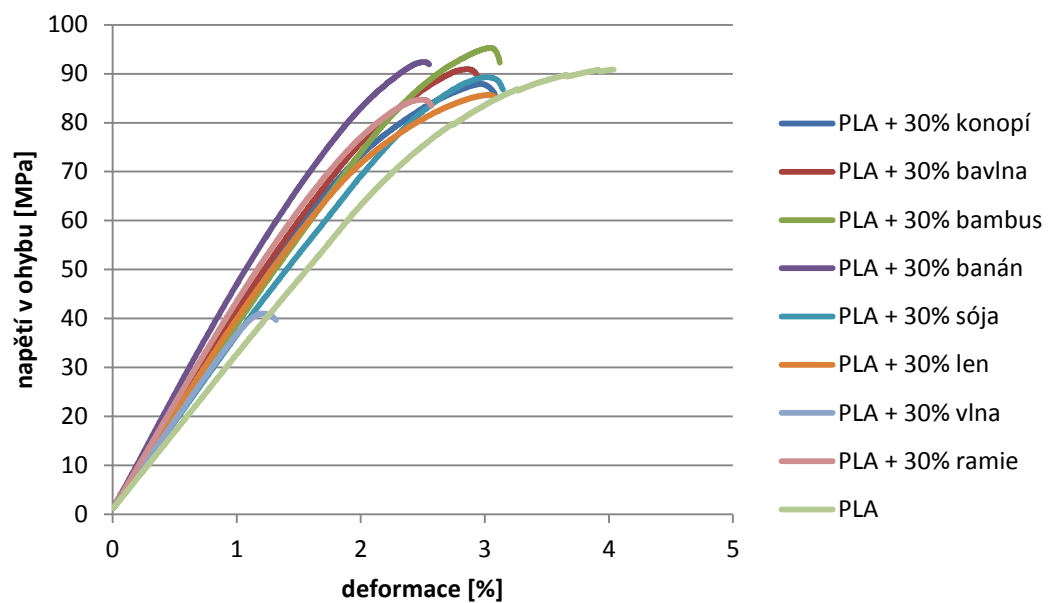
Příloha 2



Obr. P4 Závislost napětí v ohybu na deformaci PLA kompozitu s obsahem 10 % přírodních vláken



Obr. P5 Závislost napětí v ohybu na deformaci PLA kompozitu s obsahem 20 % přírodních vláken



Obr. P6 Závislost napětí v ohybu na deformaci PLA kompozitu s obsahem 30 % přírodních vláken

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 24. 5. 2013

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24. 5. 2013

Signature